

# ایجاد جریان برشی و تغییر مکان خط جریان ایستائی در جریان برشی

نوشته: دکتر جمشید فریور - استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

## چکیده

ابتدا روش ایجاد جریانهای برشی بطور مصنوعی در یک تونل باد توسط یک شبکه مستوی و متشکل از میله های افقی بررسی شده و محاسبات مربوطه همراه با نتایج تجربی ارائه گردیده است. نشان داده شده است که با چنین روشی نمیتوان جریان برشی خطی ای با شیب بیش از  $1/777$  ایجاد کرد. در بررسی خطوط جریان ایستائی روی یک جسم نتیجه می شود که در یک جریان برشی خطوط جریان ایستائی تغییر مکان داده، و حداقل این تغییر مکان تابعی است از نیمرخ سرعت و ضریب فشار. این تابع محاسبه شده و مثال عملی ارائه گردیده است.

## مقدمه

جریان هائی که در آنها سرعت تابعی از ارتفاع باشد جریانهای برشی نامیده می شوند. به عبارت کلی جریانهای با گرادیان سرعت، جریان های برشی می باشند. عملاً کلیه سازه ها در لایه مرزی زمین قرار دارند که در آن سرعت جریان هوا یا باد با ارتفاع افزایش می یابد و در نتیجه تحت تاثیر جریانهای برشی قرار دارند. بنابراین برای مطالعه اثر نیروی باد روی سازه ها می بایستی مشخصات جریان را در نزدیکی سازه ها معلوم کرد. این مشخصات را معمولاً "می توان با آزمایشات در تونل های باد معلوم نمود. در این صورت برای ایجاد چنین جریانی می بایستی در تونل باد لایه مرزی ضخیمی ایجاد کرد. این کار عملاً خالی از اشکال نیست، زیرا می بایستی تونل بادی به طول زیاد ساخت بطوری که ضخامت لایه مرزی در آن به حدی برسد که بتوان مدلی با مقیاس مناسب را در این لایه مرزی قرار داده و آزمایشات لازم را انجام داد. از این رو ساده تر خواهد بود که نیمرخ لازم را به طور مصنوعی در تونل ایجاد کرد. در زیر ابتدا به طور خلاصه طرز ایجاد چنین نیمرخ سرعتی در تونل های باد شرح داده شده و سپس مشخصات آن بیان می شود.

## ۱- ایجاد جریان برشی در تونل باد

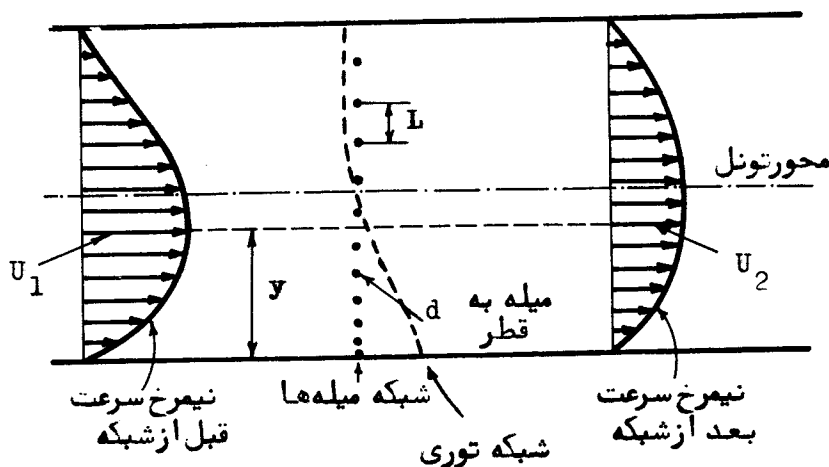
یکی از روشهای ایجاد جریان برشی در تونل باد استفاده از افت فشار مربوط به اجسام پخ مثل استوانه است. این روش برای بار اول توسط Elder [۱] معرفی گردید. وی با استفاده از یک شبکه توری منحنی که در سر راه جریان قرار داد توانست نیمرخ لازم را بدست آورد. بعدها Owen, Zienkiewicz [۲] روش ساده تری را معرفی کردند. در این روش از یک شبکه مستوی متشکل از میله های نازک افقی که به فواصل مختلف ولی معین از یکدیگر قرار دارند و در سر راه جریان قرار داده می شوند استفاده می گردد. شکل (۱) بطور شماتیک نمایش دهنده چنین شبکه هائی می باشد. چون، مطابق این شکل، تراکم میله ها در کف بیشتر است بنابراین افت جریان در این قسمت بیشتر بوده و در نتیجه سرعت جریان کاهش می یابد ولی در لایه های بالاتر که تراکم میله ها کمتر می شود سرعت بتدریج افزایش می یابد. در مورد شبکه توری تصویر تارهای شبکه در صفحه قائم دارای تراکم های متفاوت می باشند.

Elder توانست رابطه ای خطی بین توزیع سرعتهای قبل و بعد از شبکه مستوی و مشخصات شبکه بدست آورد، که از روی آن می توان شبکه را طراحی نمود. یکی از مزایای این روش بر روش شبکه توری منحنی در این است که

جریان قبل از شبکه، می‌توند غیر یکنواخت باشد. مزیت دیگر آن ساده بودن ساخت این شبکه است که ضمناً به فضای زیادی نیز احتیاج ندارد.

در شکل (۱) نیمرخ های سرعت قبل و بعد از شبکه میله (بطور شماتیک) در تونل بادی به ارتفاع  $h$  نشان داده شده است. اگر سرعت بی بعد (نسبت سرعت در ارتفاع  $y$  به سرعت در محور تونل) قبل از شبکه  $U_1$  و بعد از شبکه  $U_2$  باشد Elder نشان داد که رابطه زیر برقرار است:

$$U_2 - 1 = A(U_1 - 1) - \frac{1}{2}(1 - A) \cdot S \quad (1)$$



شکل ۱- نیمرخهای سرعت قبل و بعد از شبکه مستوی یا منحنی

که در آن  $S$  میزان مقاومت (degree of resistance) در مقابل جریان است. چون قدرت جریان (قدرتی که باعث ایجاد جریان می‌گردد) ثابت است لذا بنا بر قانون پیوستگی  $A \cdot \int_0^h s(y) dy = 0$  عددی است بی بعد که تابع ضریب برآ (lift coefficient)  $B$  و ضریب افت فشار شبکه  $K$  می‌باشد.

$$A = \frac{[(2-B)(1-K) + K]}{[(2-B) + K]} \quad (2)$$

Mc. Carthy [۳] نشان داده که  $B$  خود تابعی از  $K$  بصورت زیر است:

$$B = 1 - 1.1 / \sqrt{1 + K} \quad (3)$$

و نیز میزان مقاومت در مقابل جریان نیز تابعی از قطر میله های شبکه  $d$  و فاصله مراکز دو میله متوالی ( $L$ ) است. این رابطه به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$S = \frac{d/L}{K(1 - d^2/L^2)} - 1 \quad (4)$$

از ترکیب روابط (۱) و (۴) معادله درجه دومی برحسب  $d/L$  بدست خواهد آمد. با در نظر گرفتن  $0 < d/L < 1$  ریشه این معادله درجه دوم بصورت زیر بدست می‌آید:

$$d/L = \frac{(2X+1) - \sqrt{4X+1}}{2X} \quad (5)$$

$$X = K \left\{ 1 + \frac{2}{1-A} [A(U_1 - 1) - (U_2 - 1)] \right\} \quad (6)$$

که در آن

اکنون فرض می‌کنیم که نیمرخ سرعت مورد لزوم بعد از شبکه خطی (ساده ترین تقریب برای نیمرخ سرعت در لایه مرزی) باشد، بدین معنی که سرعت در کف برابر صفر باشد و با ارتفاع از کف بصورت خطی افزایش یابد، در این صورت:

$$U_2 - 1.0 = \lambda(y/h - \frac{1}{2}) \quad (7)$$

که در آن  $\lambda$  شیب نیمرخ سرعت است. در این حال  $K$  دارای مقداری اختیاری نیست و دارای کمینه ای برابر با  $K_0$  است که تابعی از  $\lambda$  است. بدین معنی که بازاء هر مقدار  $\lambda$ ،  $K_0$  دارای مقدار بیشینه ای خواهد بود که با توجه به رابطه  $d/L < 1$  از  $y=h$  بدست می آید. برای بدست آوردن این رابطه نگارنده روش زیر را پیشنهاد نموده است [۴].

$d/L$  را برابر صفر فرض می کنیم. این بدان معنی است که یا  $d=0$  و یا  $L$  بینهایت است، که در هر صورت هیچگونه مقاومتی در مقابل جریان وجود ندارد و افت فشار کمینه است، یعنی  $K=K_0$ . در این صورت چنانچه فرض کنیم جریان قبل از شبکه یکنواخت است ( $U_1 = 1$ ) از روابط (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$\lambda = \frac{K_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha + K_0} \quad (8)$$

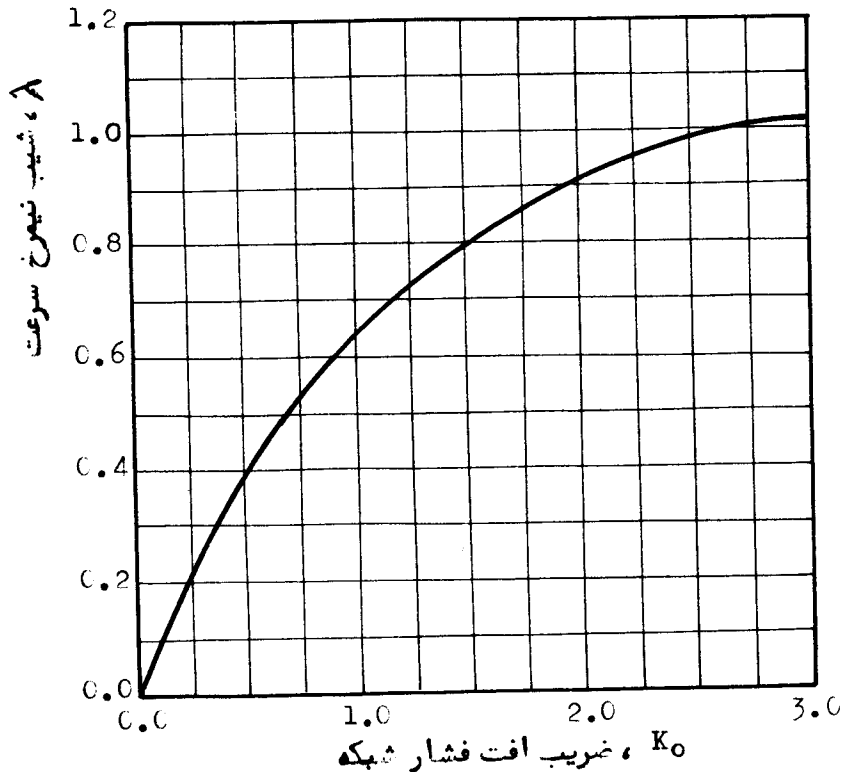
که در آن:

$$\alpha = 1.0 / \sqrt{1 + K_0} \quad (9)$$

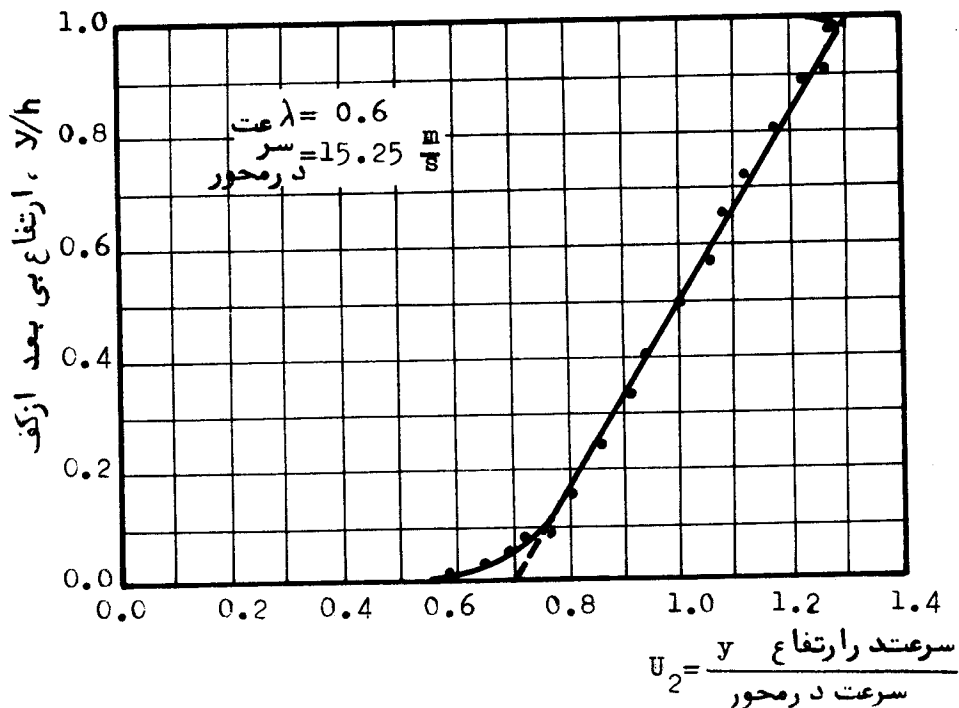
حال چون  $d/L \gg 0$  بنا بر این

$$\lambda \ll \frac{K_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha + K_0} \quad (10)$$

با مشتق گیری از رابطه فوق می توان نشان داد که بازاء کلیه مقادیر  $K_0$ ،  $\lambda$  دارای بیشینه ای است برابر با  $\lambda_{max} = 1.777$ . بدین معنی که با استفاده از این وسیله هیچگاه نمی توان بطور مصنوعی جریان برشی خطی که برای آن  $\lambda > 1.777$  است در یک تونل باد ایجاد کرد. منحنی تغییرات  $\lambda$  بر حسب  $K_0$  در شکل (۲) نشان داده شده است. برای اطمینان کامل در موقع استفاده از رابطه (۵) که محل میله های شبکه را بدست می دهد مقدار  $K$  را حداقل برابر با  $1.05K_0$  در نظر می گیریم تا از قدرت جریان حد اکثر استفاده را کرده باشیم. بایستی در نظر داشت که چون  $K$  ضریب افت فشار است بنا بر این هرچه مقدار آن بیشتر باشد افت بیشتری خواهیم داشت و در نتیجه جریان بعد از شبکه دارای سرعت متوسط کمتری خواهد بود.



شکل ۲ - منحنی تغییرات  $\lambda$  بر حسب  $K_0$



شکل ۳- نتایج تجربی سرعت برشی خطی بعد از شبکه میله‌ای [۴]

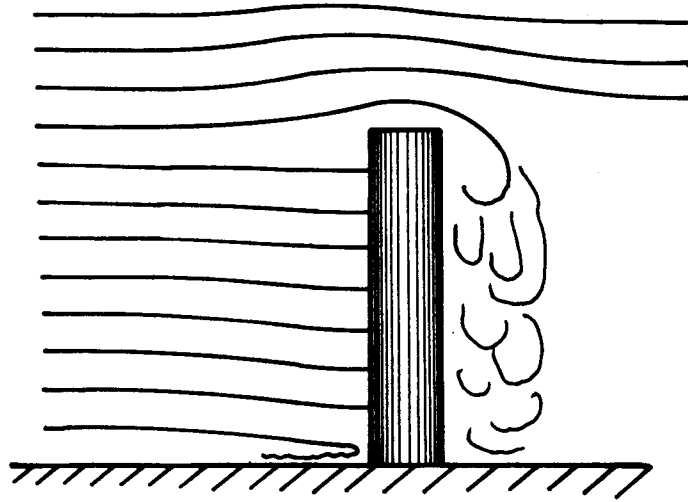
شکل ۳ نیمرخ یک جریان برشی خطی با  $\lambda=0.6$  را که عملاً "از این طریق بدست آمده [۴] نشان میدهد. قطر میله های شبکه  $d=1.6$  mm و ارتفاع تونل باد  $h=76.20$  cm بوده، و از ۱۶۲ میله استفاده شده است. در شکل (۳) علت پراکندگی نقاط در  $y/h=0$  و  $y/h=1$  وجود لایه مرزی است که قابل کنترل در این محاسبات نمی باشد. به علت سرعت کمتر، و در نتیجه لایه مرزی ضخیم تر پراکندگی نقاط در  $y/h=0$  بیش از  $y/h=1$  است.

۲- تغییر مکان خطوط جریان ایستائی در جریان برشی

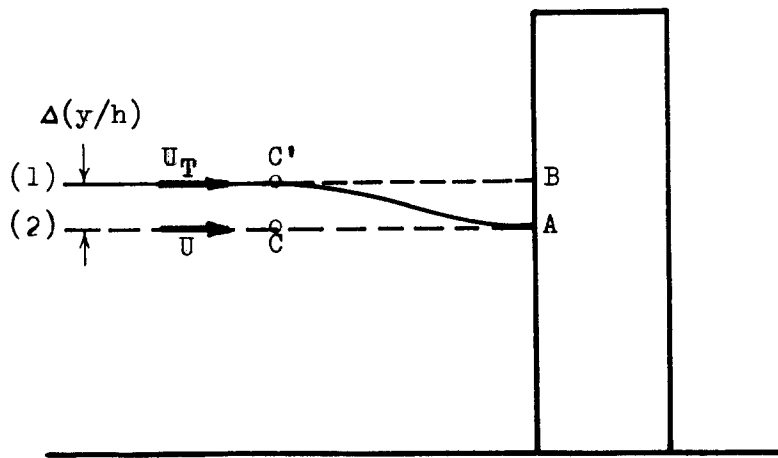
اگر جسمی در معرض جریانی قرار داشته باشد، بنا به تعریف نقاطی از این جسم که سرعت جریان در آنها صفر است نقاط ایستائی (Stagnation Points) و خطوط جریانی که در این نقاط متوقف می شوند خطوط جریان ایستائی (Stagnation Streamlines) نامیده می شوند. مکان هندسی نقاط ایستائی خط ایستائی (Stagnation Line) نام دارد. هرگاه استوانه ای در معرض جریان قرار گیرد، به علت تقارن، خط ایستائی یالی می شود که در جلوترین قسمت استوانه نسبت به جریان قرار دارد. تئوری و تجربه نشان می دهد که در یک جریان یکنواخت خطوط جریان ایستائی قبل از برخورد با جسم، خطوطی مستقیم و موازی هستند.

وقتی جریانی برشی به جسمی نزدیک می شود، خطوط جریان قبل از برخورد به جسم تغییر جهت داده و از حالت خطوط موازی خارج می شوند. این تغییر جهت به علت وجود گرادیان فشار ایستائی (فشار در نقاط ایستائی) روی سطح جسم می باشد [۴]. البته تغییر مکان خطوط جریان تابع نیمرخ سرعت می باشد. برای مثال اگر سرعت روبه بالا افزایش یابد خطوط جریان در موقع نزدیک شدن به جسم به طرف پائین خم می شوند. ولی بایستی توجه داشت که بهر حال این خطوط جریان در امتداد خط ایستائی عمود بر جسم می باشند. شکل (۴) خطوط جریان ایستائی را برای یک استوانه در جریان برشی خطی نشان می دهد.

برای محاسبه حداقل جابجائی خطوط جریان  $(\Delta Y)$  و یا بصورت بی بعد آن،  $\Delta(Y/h)$  به شکل (۵) توجه شود. در این شکل خط جریان شماره (۱) خط جریان واقعی است و  $U_T$  سرعت واقعی در امتداد این خط جریان است. این خط جریان در موقع نزدیک شدن به جسم به جای برخورد در نقطه B در نقطه A به جسم برخورد می نماید. اگر جسم وجود نداشت خط جریان (۲) از نقطه A با سرعت U عبور می کرد. در نقطه A که سرعت به صفر تقلیل پیدا می کند ضریب فشار  $C_{P0}$  می بایستی برابر با واحد باشد. زیرا اگر رابطه برنولی را بین نقاط A و C بنویسیم خواهیم داشت:



شکل ۴ - خطوط جریان حول یک استوانه در جریان برشی



شکل ۵ - تغییر مکان خط جریان ایستائی در جریان برشی

$$C_{Pc} = \frac{P_A - P_C}{1/2 \rho U_C^2} = 1 \quad (11)$$

که در آن  $P_C = P_\infty$  فشار در نقطه ای دور از جسم است و  $P_A = P_O$  فشار در نقطه ایستائی است، و نیز  $U_C = U$ . اما تجربه نشان می دهد که ضریب فشار،  $C_{Pc}$ ، در امتداد خط ایستائی در تمام نقاط بیش از واحد است. علت این موضوع این است که در حقیقت نقاط A و C روی یک خط جریان واقع نیستند، و رابطه برنولی دارای خطا می باشد. ولی نقاط A و C' روی یک خط جریان قرار داشته و رابطه برنولی را می بایستی بین این دو نقطه نوشت. در این صورت

$$(C_{Po})_T = \frac{P_O - P_\infty}{1/2 \rho U^2} = 1 \quad (12)$$

چون در این روابط  $U_T > U$ ، بنابراین  $(C_{Po})_T > C_{Pc}$  و در نتیجه اگر ضریب فشار بر اساس  $U$  محاسبه شود بیش از واحد خواهد شد. اکنون می توان حداقل تغییر مکان خط جریان را محاسبه نمود. از تقسیم روابط (۱۱) و (۱۲) خواهیم داشت:

$$(C_{Po}) / (C_{Po})_T = (U_T / U)^2$$

در نتیجه

$$U_T/U = \sqrt{C_{P_0}} \quad (13)$$

چنانچه نیمرخ سرعت را خطی فرض کنیم ، با استفاده از رابطه (۷) نتیجه می شود :

$$y/h = U/\lambda - 1/\lambda + 1/2 \quad (14)$$

$$y_T/h = U_T/\lambda - 1/\lambda + 1/2 \quad (15)$$

$$\Delta(y/h) = (y_T/h - y/h) = (U/\lambda) \cdot (U_T/U - 1) \quad \text{وینابراین}$$

با جایگذاری  $U_T/U$  از (۱۳) خواهیم داشت :

$$\Delta(y/h) = (U/\lambda) \cdot (\sqrt{C_{P_0}} - 1) \quad (16)$$

در آزمایشی [۴] در یک تونل باد به ارتفاع  $h=76.2\text{cm}$  و  $\lambda=0.6$  ضرائب فشار براساس  $U$  بدست آورده شده و نتایج در جدول زیر ارائه گردیده اند . نسبت ارتفاع استوانه (H) به قطر آن (D)  $H/D = 7.5$  می باشد .

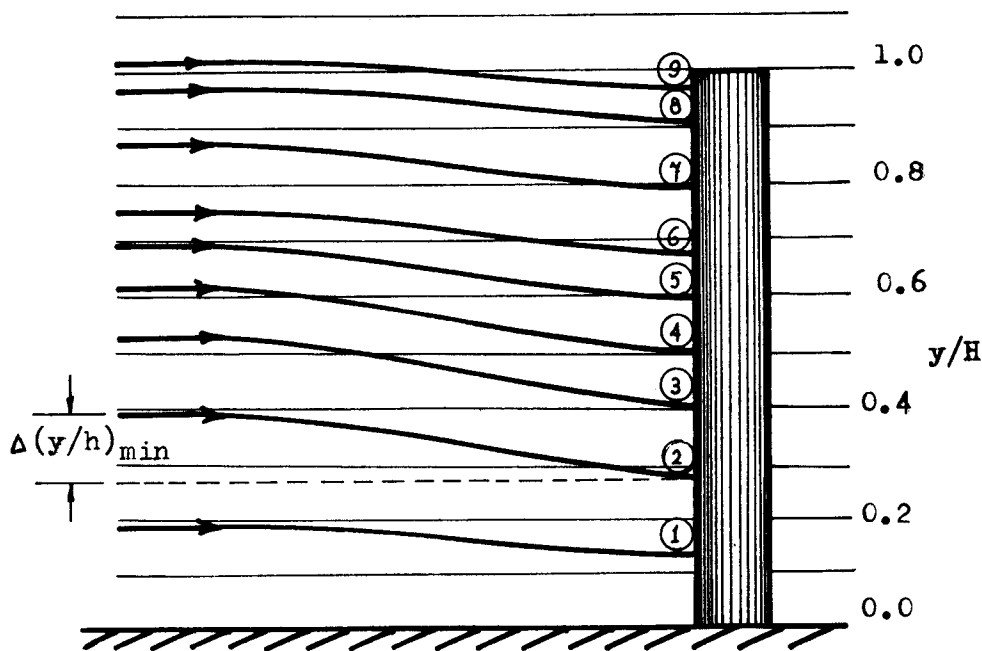
شکل (۶) خطوط جریان واقعی را که براساس رابطه (۱۶) و نتایج جدول شماره ۱ محاسبه شده اند نشان می دهد . دقت شود که

$$y/h = (y/H) \cdot (H/h) \text{ است}$$

جدول شماره ۱- نتایج تجربی ضرائب فشار ایستائی بر حسب ارتفاع

برای یک استوانه در جریان برشی [۴]

|            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $y/H$      | 0.130 | 0.267 | 0.389 | 0.495 | 0.588 | 0.667 | 0.792 | 0.908 | 0.952 |
| $C_p$      | 1.097 | 1.215 | 1.226 | 1.205 | 1.158 | 1.122 | 1.111 | 1.089 | 1.048 |
| شماره نقاط | ۱     | ۲     | ۳     | ۴     | ۵     | ۶     | ۷     | ۸     | ۹     |



شکل ۶ - خطوط جریان ایستائی برای استوانه در جریان برشی خطی

بطورکلی در محاسبه نیروی رانش (Drag Force) وارد بر یک سازه در جریان برشی می‌بایستی موضوع تغییر مکان خطوط جریان را حتماً مد نظر قرار داد. در محاسبه ضریب رانش، که تابع نیروی ماندبادمی باشد چون سرعت در هر نقطه در نزدیکی جسم بیش از سرعت در همان ارتفاع در نقطه‌ای دور از جسم است، نیروی رانش افزایش می‌یابد. در صورتیکه این موضوع در نظر گرفته نشود برای مثال در موقع محاسبه نیروی حاصل از باد روی یک سازه - می‌بایستی ضریب تصحیحی که بیش از واحد خواهد بود در نظر گرفته شود.

### فهرست منابع

- [1] Elder, J.W., "Steady Flow Through Non-Uniform Gauze of Arbitrary Shape".  
Jour. Fluid Mech., Vol. 5, 1959, pp. 355-68
- [2] Owen, P.R., & Zienkiewicz, H.K., "The Production of Uniform Shear Flow  
in a Wind Tunnel". Jour. Fluid Mech., Vol.2, 1957, pp. 521-31
- [3] Mc Carthy, J.H., "Steady Flow Past Non-Uniform Wire Grids". Jour. Fluid  
Mech., Vol. 19, 1964.
- [4] Farivar, Dj. "An Experimental Investigation of Uniform and Linearly  
Sheared Flows Around Cylinders of Finite Length".  
Ph. D. Thesis, in Mech. Eng. & Applied Mech., Univ. Of Pennsylvania,  
1975.