

## بررسی تجربی جریان هوا در لانه‌زنبوری یک تونل باد عمودی

اردکانی، محمد علی<sup>۱</sup>، انوری، آذر<sup>۲\*</sup>، اصغری تهرانی، پژمان<sup>۳</sup>، انصاری، کریم<sup>۴</sup>

۱- دانشیار پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

۲- مربی پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

۳- کارشناس مکانیک شرکت فراسنجش صبا

۴- کارشناس مکانیک، سازمان جهاد خودکفایی نزا

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۰۱

دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۲۵

### چکیده

لانه‌زنبوری یکی از اجزای تونل باد بوده که وظیفه اصلی آن یکنواخت نمودن جریان هوا و کاهش زاویه جریان است. لانه‌زنبوری در بالادست نازل در اتاق آرامش قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در تونل بادهای بزرگ و عمودی، هزینه ساخت لانه‌زنبوری بالا بوده و همچنین مشکلات نصب آن زیاد است، ضروریست که نسبت طول به قطر هیدرولیکی لانه‌زنبوری کاهش داده شود. در صورتی که این نسبت کاهش یابد، ممکن است عملکرد لانه‌زنبوری کاهش یابد. در این مقاله، طرحهای مختلفی برای لانه‌زنبوری ارائه شده و کیفیت جریان به صورت تجربی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به این منظور، جریان در پایین‌دست لانه‌زنبوری با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ و زاویه‌سنج جریان (Yaw head) اندازه‌گیری و بررسی شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با کاهش نسبت طول به قطر هیدرولیکی لانه‌زنبوری از ۷ به ۲، عملکرد لانه‌زنبوری در تغییر زاویه جریان هوا در بازه  $20^{\circ}$  تا  $20^{\circ}$  مناسب بوده است. این نتایج در طراحی یک تونل باد عمودی با نام طرح طوفان مورد استفاده قرار گرفته است. این تونل باد ویژه شبیه‌سازی عملیات چتربازی می‌باشد. از این‌رو می‌توان در طرح تونل باد فوق، طرح لانه‌زنبوری به شکل مربع و با نسبت ۲ را انتخاب نمود و هزینه ساخت آن را حدود ۶۰٪ کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: لانه‌زنبوری، تونل باد، جریان‌سنج سیم داغ، اندازه‌گیری زاویه جریان هوا

## مقدمه

برای شبیه‌سازی عملیات سقوط آزاد، از تونل باد عمودی بزرگ استفاده می‌شود. توری و لانه زنبوری از اجزاء تونل باد هستند که وظیفه افزایش کیفیت جریان هوا و کاهش اغتشاش‌های جریان را به عهده دارند. کیفیت جریان هوا با یکنواختی جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن، مشخص می‌گردد [۱]. توری در اتاق آرامش، گردابه‌های بزرگ را به گردابه‌های کوچک‌تر شکسته و در نتیجه شدت اغتشاش‌های محوری را در محوطه پرواز کاهش می‌دهد. لانه زنبوری نیز زاویه جریان هوا و همچنین شدت اغتشاش‌های جانبی جریان هوا را کاهش می‌دهد. لانه زنبوری معمولاً با مقطع شش ضلعی، مربع، مثلث و دایروی طراحی و ساخته می‌شود. پارامترهای اصلی طراحی برای لانه زنبوری نسبت طول لانه زنبوری به قطر <sup>۱</sup> و همکاران [۳] از چندین لانه زنبوری با ابعاد و شکل‌های مختلف برای کاهش اغتشاش جریان آزاد در تونل باد استفاده نموده و تاثیر مشخصات آنها را به صورت تجربی مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات ایشان، ابعاد هندسی بهینه برای لانه زنبوری و موقعیت مناسب آن را در تونل باد (که برای به حداقل رساندن سطح اغتشاش جانبی در مقطع آزمون تونل لازم است)، تعیین نموده است. لورکه<sup>۲</sup> و همکاران وی نیز [۴] در زمینه کنترل اغتشاش جریان آزاد با استفاده از لانه زنبوری تحقیق نموده و تاثیر طول لانه زنبوری بر اغتشاشات جریان هوا را مورد مطالعه و تحقیق قرار داده است. وی شدت اغتشاش در هوا را با استفاده از جریان سنج سیم داغ و شدت اغتشاش در جریان آب را با استفاده از تصویر سازی حبابهای هیدروژن اندازه‌گیری نمود. نتایج تحقیقات وی نشان داد که اگرچه شدت اغتشاش‌های جانبی در لانه زنبوری کاهش می‌یابد، ولی با توجه به جریان برشی در لانه زنبوری، شدت اغتشاش‌های محوری جریان هوا در خروجی لانه زنبوری افزایش پیدا می‌کند. لذا نیاز است که در پایین دست لانه زنبوری‌ها، توری‌های ریز قرار گیرند. این محقق با استفاده از نتایج تحقیقات بدست آمده، پیشنهاد داد که به منظور کاهش اغتشاش‌های جریان آزاد در تونل‌های آب و هوا، یک چیدمان ترکیبی از لانه زنبوری و توری به کار گرفته شود تا عملکرد بهینه حاصل شود. توری‌ها در مجاورت پایین دست لانه زنبوری قرار می‌گیرند. شیمان<sup>۳</sup> و بروکست<sup>۴</sup> نیز به مقایسه تحقیقات تجربی و نظری اغتشاش در توری و لانه زنبوری و نیز ترکیب توری و لانه زنبوری پرداخته‌اند [۵]. نتایج تحقیقات

سلول آن و نسبت سطح باز روزنه‌ها به سطح کل لانه زنبوری بوده است. نسبت‌های متداول برای طول به قطر سلول در بازه‌ی ۶ الی ۸ و برای نسبت روزنه‌ها در حدود ۰/۸ می‌باشد. همچنین ضخامت دیواره لانه زنبوری نیز در حدود ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. جنس لانه زنبوری نیز معمولاً از نوع آلومینیوم می‌باشد [۲].

دستیابی به جریان یکنواخت هوا در مقطع آزمون یا محوطه پرواز یک تونل باد برای نزدیک به یک قرن دنبال شده است. راهکار اصلی برای حصول جریان یکنواخت، استفاده از لانه زنبوری برای هدایت جریان به یک جهت اصلی و نیز بکارگیری توری‌ها بوده است [۱]. محققین متعددی با استفاده از روشهای عددی و تجربی، در زمینه بررسی عملکرد لانه زنبوری تحقیق نموده‌اند. میخالیلووا ایشان نشان داده است که اگر توری‌ها به تنهایی بکار گرفته شوند، اغتشاش‌های محوری بیشتر از اغتشاش‌های جانبی کاهش می‌یابد، در صورتیکه لانه زنبوری اغتشاش‌های جانبی را بیشتر از اغتشاش‌های محوری تضعیف می‌کند. به همین دلیل چیدمان مرکب لانه زنبوری و توری در پایین دست آن، یک چیدمان مطلوب برای کاهش اغتشاش می‌باشد. کالکامی<sup>۵</sup> و همکاران [۶] به منظور کنترل اغتشاش در یک تونل باد مادون صوت، شبیه‌سازی عددی ترکیبات توری و لانه زنبوری را انجام داده و ملاحظات طراحی توری و لانه زنبوری را برای یک تونل باد مدار باز در انستیتو تکنولوژی گواهایتی<sup>۶</sup> هند شناسایی و ارائه نموده است. این شبیه‌سازی برای لانه زنبوری‌های مختلف با طول‌های متفاوت و شکل سلول‌های مختلف انجام گرفته و تطابق خوبی با نتایج تجربی و نظری موجود داشته است.

انتخاب توری و لانه زنبوری برای یک تونل باد، وابستگی زیادی به هدف و کاربرد تونل مورد نظر دارد. در تونل‌بادهایی که به منظور آزمایش‌های آیرودینامیکی ساخته می‌شود، شدت اغتشاش جریان از اهمیت بالایی برخوردار است، ولی در تونل باد عمودی مورد نظر که ویژه شبیه‌سازی عملیات هوانوردی و سقوط آزاد می‌باشد، یکنواختی جریان و زاویه آن از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا با توجه به ماموریت تونل باد، شدت اغتشاش‌های جریان از اهمیت کمتری برخوردار بوده و می‌توان طول لانه زنبوری را کوتاه نمود. مقطع اتاق پرواز طرح تونل باد به شکل ۸ ضلعی بوده و قطر دایره محاطی آن ۵/۳ متر است. نازل آن نیز به شکل ۸ ضلعی بوده و قطر دایره محاطی آن ۲/۲۵ متر می‌باشد. این ابعاد بسیار بزرگ بوده، و در نتیجه

برای پنج نسبت طول به قطر موثر ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ انجام شده است.



شکل ۲ - مدل‌های لانه زنبوری با نسبت‌های مختلف طول به عرض سلول

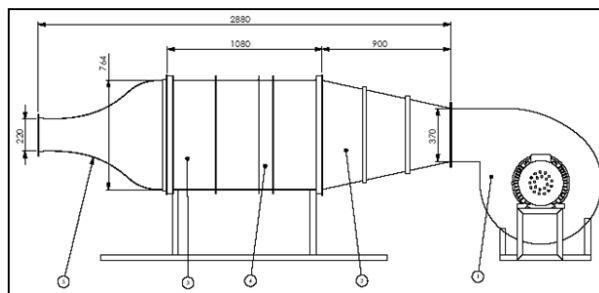
به منظور بررسی تاثیر مشخصات لانه زنبوری بر زاویه جریان هوا، لانه زنبوری به دهانه خروجی تونل باد دمنده متصل شده و با استفاده از مکانیزم تغییر زاویه لانه زنبوری، زاویه آن نسبت به جریان خروجی از نازل تغییر می‌یابد. سپس با استفاده از زاویه سنج جریان هوا، زاویه جریان هوا پس از لانه زنبوری اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که زاویه سنج جریان هوا بر روی مکانیزم انتقال دهنده نصب شده است. خروجی زاویه سنج که اختلاف فشار می‌باشد، به فشارسنج‌های الکترونیکی متصل شده است. داده‌های فشارسنج‌ها از طریق کارت A/D به رایانه ارسال شده و توسط نرم‌افزار مربوط تجزیه و تحلیل می‌شوند. همچنین با استفاده از لوله استاتیکی پیتو، سرعت جریان هوا اندازه‌گیری می‌شود.

با استفاده از نقاله نصب شده بر روی مکانیزم تغییر زاویه، می‌توان زاویه لانه زنبوری را اندازه‌گیری نمود. با تغییر زاویه لانه زنبوری و مشخص نمودن زاویه آن، جریان هوای خروجی از لانه زنبوری اندازه‌گیری شده و عملکرد لانه زنبوری مشخص می‌شود. همچنین به منظور تعیین بهترین محل قرارگیری پرآب زاویه‌سنج، سرعت و اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست لانه زنبوری اندازه‌گیری و تحلیل شده است. به این منظور از جریان سنج سیم داغ استفاده شده است. این جریان سنج ساخت شرکت فرانسجش صبا بوده و سنسور سیم داغ آن از جنس تنگستن با ضخامت  $5 \mu\text{m}$  است. برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت جریان ورودی به رادیاتور نیز از مکانیزم انتقال دهنده پرآب استفاده شده است. این مکانیزم، با استفاده از سه موتور پله‌ای قادر است در سه جهت با دقت  $0.1 \text{ mm}$  حرکت نماید.

هزینه ساخت لانه زنبوری برای چنین ابعادی بالا می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل ابعاد بزرگ، وزن لانه زنبوری نیز زیاد شده که ساخت و نصب آن را با مشکلاتی روبرو می‌سازد. در صورتی که نسبت طول لانه زنبوری به قطر سلول آن کاهش یابد، هزینه ساخت آن کاهش یافته و همچنین مشکلات ساخت و نصب آن نیز کاهش می‌یابد، اما با کاهش نسبت طول لانه زنبوری به قطر سلول آن، امکان کاهش تأثیر لانه زنبوری بر کنترل زاویه جریان هوا وجود دارد. در این مقاله پژوهشی که به صورت تجربی می‌باشد، انتخاب نسبت طول به قطر برای سلول لانه زنبوری در یک تونل باد عمودی مورد نظر بوده و تأثیر این نسبت بر روی زاویه و کیفیت جریان هوا مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

## روش آزمایش

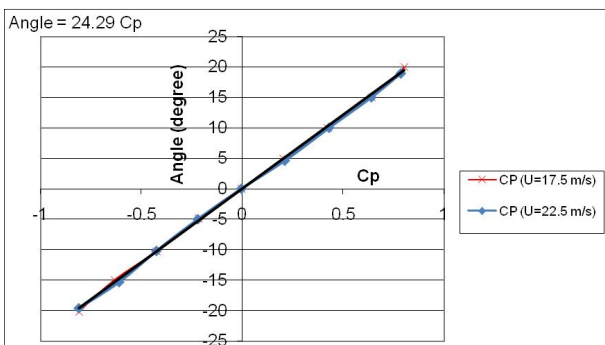
کلیه آزمایش‌ها در سایت تونل باد عمودی و با استفاده از یک تونل باد کوچک انجام شده است. تونل باد فوق از نوع مدار باز دمنده بوده و در شکل ۱ نشان داده شده است. فن مورد استفاده در این تونل، از نوع سانتریفیوژ بوده و سرعت جریان هوا با استفاده از سیستم کنترل دور، تغییر می‌یابد. به منظور به دست آوردن جریان با شدت اغتشاش کم، تونل باد فوق دارای چهار عدد توری، با مش ۲۰ می‌باشد که دو عدد آن در دیفیوزر زاویه باز، بین فن و اتاق آرامش قرار داشته و دو عدد دیگر نیز در اتاق آرامش قرار دارد. همچنین به منظور یکنواخت نمودن جریان هوا در اتاق آرامش از لانه زنبوری استفاده شده است.



شکل ۱- تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء:  
۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- نازل

شکل ۲ مدل‌های لانه زنبوری را با نسبت‌های مختلف طول به عرض نشان می‌دهد که به شکل شش ضلعی و از جنس آلومینیوم می‌باشند. قطر موثر لانه زنبوری ۷ میلی‌متر بوده و ضخامت دیواره آن  $0.1$  میلی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها

شکل ۴ منحنی بی‌بعد شده  $C_p$  را بر حسب زاویه حمله جریان هوا در سرعت‌های  $17.5 \text{ m/s}$  و  $22.5 \text{ m/s}$  برای زاویه‌سنج جریان هوا نشان می‌دهد. منحنی فوق کاملاً خطی بوده و با رابطه  $\text{angle} = 24.29 C_p$  برازش می‌شود. این رابطه، منحنی کالیبراسیون زاویه‌سنج جریان هوا می‌باشد. لازم به ذکر است نتایج کالیبراسیون نشان می‌دهد که در زاویه‌های خارج از بازه  $20^\circ$  تا  $-20^\circ$ ، عملکرد زاویه‌سنج فوق غیر خطی بوده و قابل استفاده نمی‌باشد.



شکل ۴- منحنی فشار بی‌بعد شده  $C_p$  بر حسب زاویه حمله جریان هوا در سرعت‌های  $17.5 \text{ m/s}$  و  $22.5 \text{ m/s}$  برای زاویه سنج جریان

#### آنالیز خطا

خطاهای این تحقیق را می‌توان به دو قسمت شامل خطاهای ناشی از اندازه‌گیری و خطاهای ناشی از ساختار<sup>۷</sup> بستر آزمون تقسیم نمود. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از جریان سنج سیم داغ و همچنین زاویه سنج جریان هوا انجام می‌شود. خطاهای مربوط به جریان‌سنج سیم داغ ناشی از خطای کالیبراسیون، کارت  $A/D$  (خطای ناشی از تفکیک پذیری) و دمای محیط می‌باشد. حداکثر خطای کالیبراسیون حدود  $0.1\%$  می‌باشد. خطای ناشی از کارت  $A/D$  نیز بستگی به دقت داده‌برداری دارد. در صورتیکه کارت  $A/D$ ،  $12$  بیتی باشد، خطای ناشی از آن حدود  $0.08\%$  می‌باشد. تاثیر دمای محیط بر نتایج جریان‌سنج سیم داغ نیز با اندازه‌گیری و سیستم پردازش اصلاح شده و حدود  $0.13\%$  برای هر درجه سانتیگراد می‌باشد، لذا خطای اندازه‌گیری با جریان‌سنج سیم داغ کمتر از  $0.13\%$  است [۸] و [۹]. موقعیت پراب نیز بستگی به مکانیزم انتقال دهنده پراب دارد که با توجه به سیستم مورد استفاده، خطای اندازه‌گیری آن  $0.1 \text{ mm}$  است.

اندازه‌گیری زاویه جریان هوا نیز با استفاده از زاویه سنج جریان بر مبنای اختلاف فشار بین سوراخهای پراب انجام

کنترل حرکت مکانیزم انتقال‌دهنده پراب، توسط نرم افزار مربوطه و از طریق درگاه سریال رایانه انجام می‌شود. در این آزمایش، موقعیت پراب با حرکت مکانیزم انتقال دهنده تغییر نموده و با استفاده از جریان سنج سیم داغ، سرعت جریان در نقاط مختلف اندازه‌گیری شده و داده‌ها از طریق کارت  $A/D$   $12$  بیتی به رایانه ارسال گردیده و توسط نرم افزار پردازش شده است. با توجه به فرکانس اغتشاشات جریان، فرکانس نمونه‌برداری داده‌ها  $5 \text{ KHz}$  بوده و زمان اندازه‌گیری در هر نقطه  $20$  ثانیه می‌باشد [۲] و [۷].



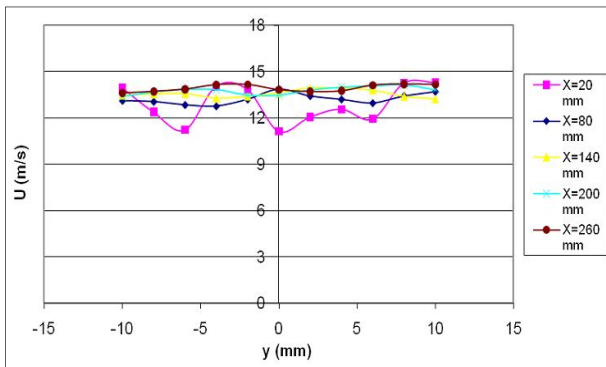
شکل ۳- چگونگی نصب لانه زنبوری به خروجی نازل و قرارگیری کاوشگر زاویه سنج جریان

به‌منظور اندازه‌گیری زاویه جریان هوا نیاز است که در ابتدا زاویه سنج جریان هوا کالیبره شود. برای کالیبره نمودن زاویه‌سنج، این پراب در زوایای مختلفی قرار گرفته و فشار اوریفیس‌های بالایی و پایینی آن اندازه‌گیری می‌شود. فشارهای اندازه‌گیری شده در اوریفیس‌های بالا و پایین، عکس یکدیگر بوده و به صورت خطی با زاویه جریان هوا تغییر می‌کنند. مقدار فشار اندازه‌گیری شده، بستگی به سرعت جریان هوا دارد. بنابراین به‌منظور بی‌بعد نمودن فشارهای فوق از رابطه ۱ استفاده شده است.

$$C_p = (P_u - P_d) / (0.5 \rho U^2) \quad (1)$$

در رابطه فوق :

- $P_u$  فشار اندازه‌گیری شده در اوریفیس بالایی
- $P_d$  فشار اندازه‌گیری شده در اوریفیس پایینی و
- $U$  سرعت جریان هوا می‌باشد.

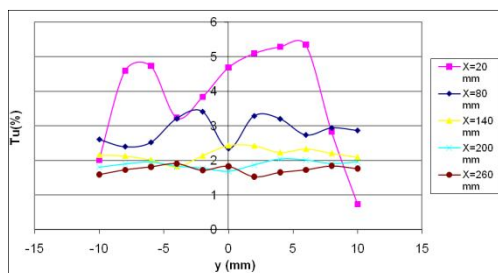


شکل ۵ - توزیع سرعت در پایین دست لانه زنبوری در سرعت جریان U=14 m/s

شکل ۶ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا را در سرعت ۱۴ m/s نشان می‌دهد که در پایین دست لانه زنبوری با جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است.  $T_{U_i}$  مبین شدت اغتشاش‌های جریان بوده و به صورت ذیل تعریف شده است:

$$T_{U_i} = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \times 100 \quad (2)$$

در شکل ۶ مشاهده می‌شود، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در فاصله ۲۰ میلی‌متری از پایین دست لانه زنبوری، بالا بوده و همچنین تغییرات آن نیز شدید می‌باشد. این شدت اغتشاش‌ها حدود ۲ تا ۵/۵ درصد می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین دست لانه زنبوری و در فاصله  $x=140$  mm، این شدت اغتشاش‌ها به حدود حداکثر ۲/۵٪ کاهش یافته و توزیع آن یکنواخت‌تر می‌شود. با افزایش فاصله از پایین دست لانه زنبوری، این اغتشاش‌ها به کمتر از ۲٪ می‌رسد. اغتشاش‌های محوری ناشی از ناحیه دنباله پشت دیواره سلول‌ها و لابه مرزی ایجاد شده در لانه زنبوری، می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در صورتیکه کاهش اغتشاش‌های محوری با استفاده از توری مورد نظر باشد، توری را حداقل باید در فاصله ۲۰ سانتی‌متری یا بیشتر از پایین دست لانه زنبوری قرار داد.



شکل ۶ - توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست لانه زنبوری U=14 m/s

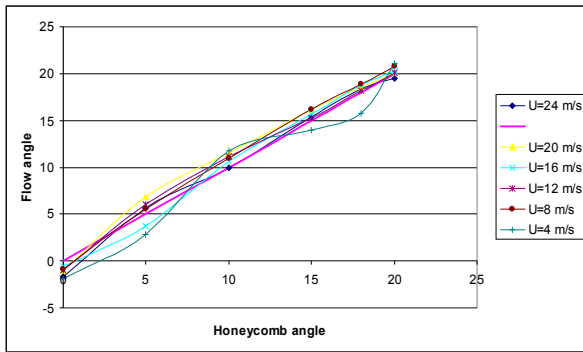
می‌شود. فشار سنج مورد استفاده از نوع دیفرانسیلی و ساخت شرکت هانی‌ول می‌باشد. بازه عملکرد آن ۱۲۵۰ پاسکال و دقت اندازه‌گیری آن ۰/۲۵٪ درصد نسبت به خط راست می‌باشد. حساسیت فشار سنج نیز حدود ۱/۵ پاسکال است. با توجه به اینکه زاویه سنج بر مبنای اختلاف فشار کل دو سوراخ پراب، اندازه‌گیری لازم را انجام می‌دهد، لذا در سرعت‌های پایین و با زوایای کم، هنگامیکه اختلاف فشار دو اوریفیس زاویه سنج کم باشد، خطای اندازه‌گیری، خطای ذاتی بوده و می‌تواند تا ۰/۵٪ افزایش یابد.

ساختار آزمون و زاویه سنج جریان نیز با نقاله و به صورت دستی تنظیم می‌شود و دقت آن ۱ تا ۲ درجه می‌باشد.

## نتایج اندازه‌گیری

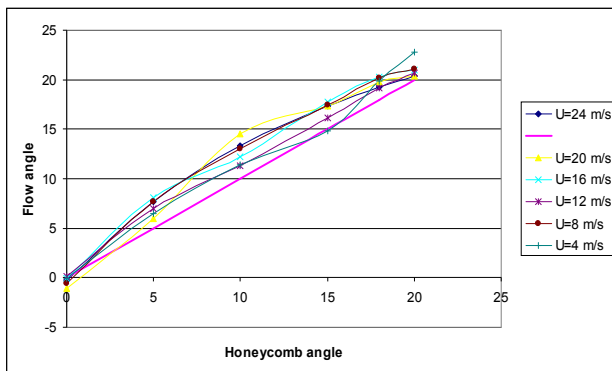
### الف - توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های آن در پایین دست لانه زنبوری

لانه زنبوری علاوه بر اینکه جریان هوا را مستقیم می‌کند، پروفیل سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های محوری آن را نیز تغییر می‌دهد، به صورتیکه اغتشاش‌های محوری در پایین دست آن افزایش می‌یابد [۵]. به منظور بررسی و مشخص نمودن محل قرارگیری زاویه سنج جریان هوا، مناسب است که جریان هوا در پایین دست لانه زنبوری اندازه‌گیری شده و تغییرات آن مشخص شود. نتایج تغییرات سرعت پایین دست لانه زنبوری در سرعت ۱۴ m/s در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در فاصله ۲۰ mm از پایین دست لانه زنبوری، تغییرات سرعت حدود ۳ m/s الی ۴ m/s می‌باشد که این تغییرات شدید بوده و ناشی از ناحیه دنباله پایین دست دیواره سلول‌های لانه زنبوری است. با افزایش فاصله پایین دست، تغییرات سرعت کمتر می‌شود به طوریکه در فاصله ۱۴۰ mm این تغییرات، کمتر از ۰/۸ m/s می‌شود. بنابراین قرار دادن زاویه سنج جریان در فاصله ۱۴۰ mm به بعد مناسب است.

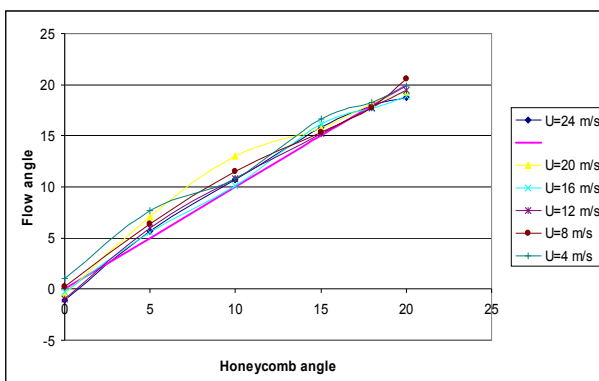


شکل ۸ - تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان برای حالت  $\frac{L}{W} = 3$  در سرعت‌های مختلف جریان

شکل‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ نیز تأثیر لانه زنبوری بر جریان هوا را برای حالتی که نسبت طول به قطر آن به ترتیب ۴، ۵ و ۷ است، نشان می‌دهد. در این شکل‌ها نیز، هم‌خوانی زاویه جریان خروجی از لانه زنبوری و زاویه لانه زنبوری مناسب بوده و جریان به صورت قابل قبولی مستقیم شده است.



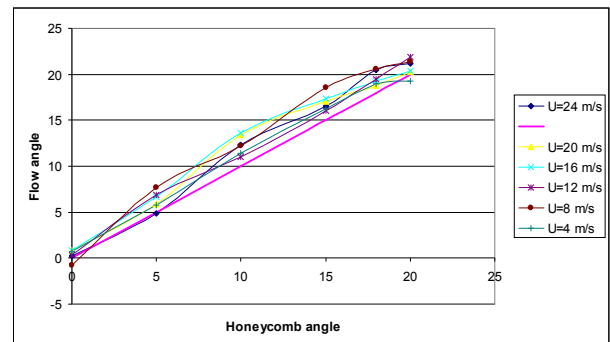
شکل ۹ - تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان برای حالت  $\frac{L}{W} = 4$  در سرعت‌های مختلف جریان



شکل ۱۰ - تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان برای حالت  $\frac{L}{W} = 5$  در سرعت‌های مختلف جریان

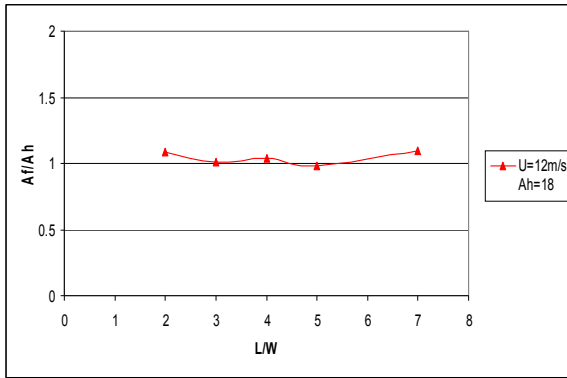
### ب- تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان

همان‌گونه که بیان شد، هدف از بکارگیری لانه زنبوری در تونل باد، کاهش زاویه جریان ورودی به محوطه پرواز تونل باد می‌باشد. به‌منظور کاهش هزینه و همچنین کاهش مشکلات ساخت در تونل بادهای بزرگ، نیاز است که نسبت طول به قطر سلول لانه زنبوری را کاهش داد. بدین‌منظور آزمون‌های مختلف بر روی تونل باد با لانه‌زنبوری‌هایی با سلول‌های متفاوت انجام گرفت. در شکل ۷ تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان هوا را برای نسبت طول به قطر سلول معادل با ۲، در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی زاویه لانه زنبوری و محور عمودی زاویه اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷ زاویه ایده‌آل که همان زاویه لانه زنبوری یا نیمساز ربع اول مختصات است، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، مابین نتایج، هم‌خوانی مطلوبی وجود دارد.



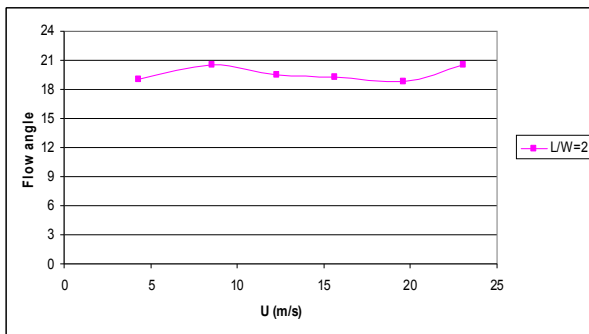
شکل ۷ - تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان برای نسبت طول به قطر  $\frac{L}{W} = 2$  در سرعت‌های مختلف جریان

شکل ۸ تأثیر لانه زنبوری را برای حالتی که نسبت طول به قطر  $\frac{L}{W} = 3$  است، نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل فوق نشان می‌دهد، در سرعت‌های کم، اختلاف بیشتری بین زاویه جریان اندازه‌گیری شده و زاویه لانه زنبوری وجود دارد. با توجه به اینکه زاویه‌سنج بر مبنای اختلاف فشار کل دو سوراخ پراب، اندازه‌گیری لازم را انجام می‌دهد، لذا در سرعت‌های پایین که اختلاف فشار دو اوریفیس زاویه‌سنج کم باشد، خطای اندازه‌گیری بیشتر خواهد بود.



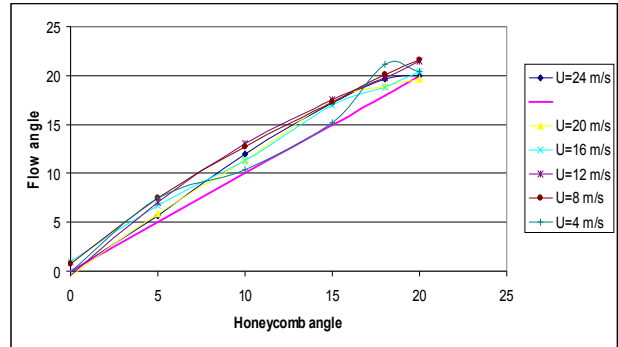
شکل ۱۳ - تأثیر نسبت طول به قطر بر زاویه بی‌بعد شده جریان خروجی از لانه زنبوری

شکل ۱۴ تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری را با نسبت طول به قطر  $\frac{L}{W} = 2$  و در زاویه ۱۸ درجه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تأثیر سرعت جریان هوا بر روی خروجی لانه زنبوری ناچیز بوده و تغییرات آن نیز روند خاصی را نشان نمی‌دهد.



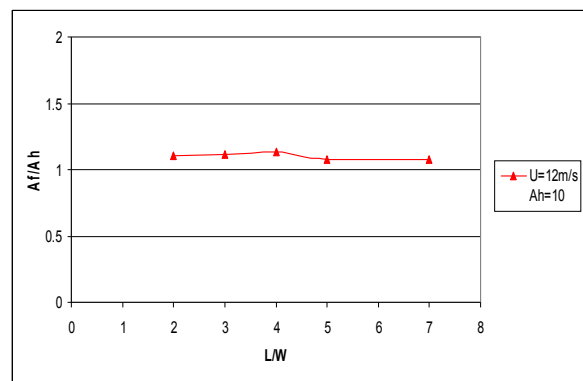
شکل ۱۴ - تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری با نسبت  $\frac{L}{W} = 2$  در زاویه ۱۸ درجه

شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نیز تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری را به ترتیب در نسبت‌های مختلف طول به قطر ۳، ۴، ۵ و  $\frac{L}{W} = 37$  (در زوایای لانه زنبوری ۱۰ و ۱۸ درجه) نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تأثیر سرعت جریان هوا بر خروجی لانه زنبوری ناچیز است.



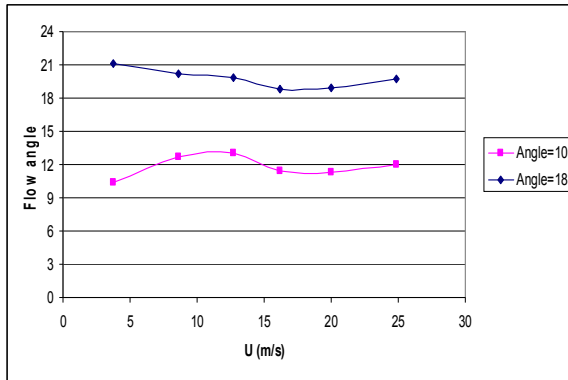
شکل ۱۱ - تأثیر لانه زنبوری بر زاویه جریان برای حالت  $\frac{L}{W} = 7$  در سرعت‌های مختلف جریان

به‌منظور بررسی بهتر تأثیر نسبت طول به قطر لانه زنبوری بر روی جریان ورودی، با استفاده از نتایج شکل‌های ۷ الی ۱۱، شکل ۱۲ استخراج شده و زاویه بی‌بعد شده جریان خروجی از لانه زنبوری  $(A_f/A_h)$  در نسبت‌های مختلف طول به قطر سلول ترسیم شده است. در رابطه فوق  $A_f$  زاویه جریان خروجی از لانه زنبوری و  $A_h$  زاویه لانه زنبوری است. سرعت جریان هوا در شکل فوق  $12 \text{ m/s}$  بوده و زاویه لانه زنبوری ۱۰ درجه است. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، این نسبت با افزایش نسبت طول به قطر سلول، اندکی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲ - تأثیر نسبت طول به قطر سلول بر زاویه بی‌بعد شده جریان خروجی از لانه زنبوری

شکل ۱۳ تأثیر نسبت طول به قطر سلول را بر زاویه بی‌بعد شده جریان خروجی از لانه زنبوری در سرعت جریان  $12 \text{ m/s}$  و زاویه لانه زنبوری ۱۸ درجه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، تأثیر نسبت طول به قطر سلول بر زاویه جریان خروجی از لانه زنبوری در زاویه ۱۸ درجه ناچیز است.



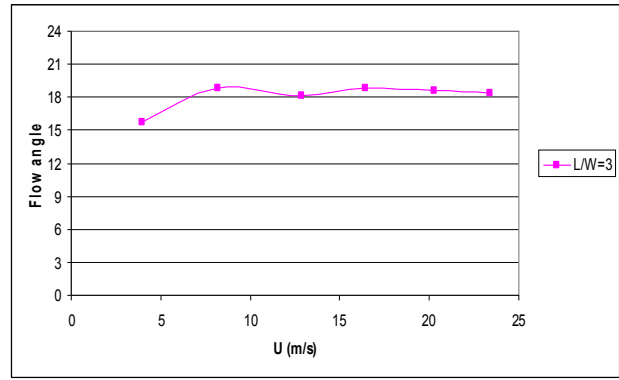
شکل ۱۸ - تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری با نسبت  $\frac{L}{W} = 7$  در زوایای ۱۰ و ۱۸ درجه

### جمع‌بندی:

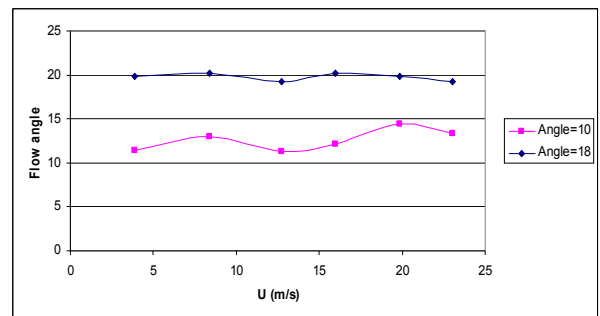
به‌منظور یکنواخت نمودن شدت اغتشاش‌ها و کاهش زاویه جریان هوا در تونل باد، از لانه زنبوری استفاده می‌شود. محل قرارگیری لانه زنبوری در اتاق آرامش قبل از نازل بوده که کمترین سرعت جریان هوا در آن مقطع می‌باشد. معمولاً نسبت طول به قطر هیدرولیکی سلول لانه زنبوری را حدود ۶ الی ۸ در نظر گرفته که در این صورت، هزینه ساخت آن برای تونل بادهای بزرگ، زیاد خواهد شد. همچنین برای تونل بادهای عمودی، ساخت و نصب آن نیز با مشکلات فراوانی همراه خواهد بود. از این‌رو هدف از پژوهش فوق، بررسی و چگونگی کاهش نسبت طول به قطر سلول لانه زنبوری بوده و نتایج زیر حاصل شده است.

➤ با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ، سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین‌دست لانه زنبوری بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در فاصله بیش از ۱۴۰ میلی‌متر از لانه زنبوری، سرعت جریان هوا یکنواخت شده و می‌توان زاویه‌سنج را در آن منطقه قرار داد. همچنین شدت اغتشاش‌های ناشی از لانه زنبوری در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری به کمترین مقدار خود (حدود ۰.۲٪) کاهش می‌یابد. از این‌رو بهتر است پس از لانه زنبوری، توری قرار گیرد و این فاصله باید حداقل ۰.۲ متر باشد. توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌ها بستگی به نسبت طول به قطر سلول لانه زنبوری ندارد.

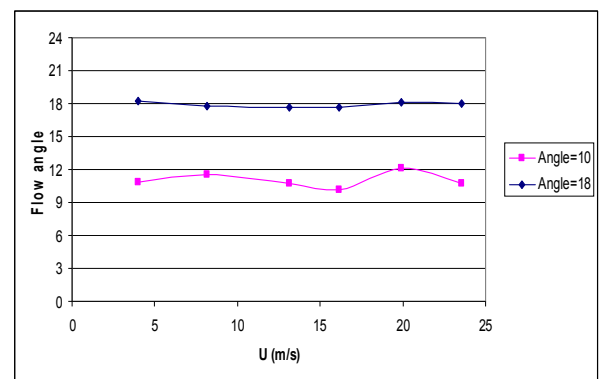
➤ تأثیر سرعت در بازه ۴ m/s تا ۲۲ m/s بر روی مستقیم نمودن جریان توسط لانه زنبوری‌ها ناچیز می‌باشد. این بازه سرعت، بازه متداول در اتاق آرامش تونل باد می‌باشد.



شکل ۱۵ - تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری با نسبت  $\frac{L}{W} = 3$  در زاویه ۱۸ درجه



شکل ۱۶ - تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری با نسبت  $\frac{L}{W} = 4$  در زاویه‌های ۱۰ و ۱۸ درجه



شکل ۱۷ - تأثیر سرعت جریان هوا بر زاویه جریان هوای خروجی از لانه زنبوری با نسبت  $\frac{L}{W} = 5$  در زوایای ۱۰ و ۱۸ درجه



## منابع و مراجع

- [1] Barlow, J. B., Rae, W. H. and Pope, A. "Low Speed Wind Tunnel Design Testing", Wiley-Inter science Publication, 1999, John Wiley and Sons, Inc.
- [۲] اردکانی محمدعلی، "جریان سنج سیم داغ"، انتشارات دانشگاه خواجه نصیر طوسی، ۱۳۸۵
- [3] Mikhailova, N.P., Repik, E.U. and Sosedko, Yu.P., "Optimal Control of Free-Stream Turbulence Intensity by Means of Honeycombs", Fluid Dynamics, Vol. 29, No. 3, 1994
- [4] Loehrke, R.I., Nagib, H.M., "Control of Free-Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation", Journal of Fluids Engineering, September 1976
- [5] Scheiman and J.D. Brookst, " Comparison of Experimental and Theoretical Turbulence Reduction from Screens, Honeycomb, and Honeycomb-Screen Combinations", Va. J. AIRCRAFT, Vol. 18, No. 8, 1980
- [6] Kulkarni, V., Sahoo, N., Chavan, S.D., "Simulation of honeycomb-screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 99, 2011
- [۷] اردکانی محمدعلی، "گزارش طرح نیمه صنعتی جریان سنج سیم داغ"، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، ۱۳۸۴
- [8] H.H. Bruun., "Hot-Wire anemometry principles and signal analysis", 1995, Oxford Science Publications
- [9] Finn E. Jrgensen, "How to measure turbulence with hot-wire anemometers-a practical guide", Dantec Dynamics, 2002

➤ اندازه گیری های انجام شده، نشان می دهد که تغییر زاویه جریان هوا در بازه  $20^{\circ}$  تا  $20^{\circ}$ ، برای لانه زنبوری ها با نسبت های طول به قطر ۲ تا ۷، مشابه می باشد. با توجه به اینکه تاثیر طول به قطر لانه زنبوری عمدتاً بر روی کاهش اغتشاش های جانبی می باشد، لذا در تونل باد های عمودی که شدت اغتشاش های جانبی آن از اهمیت بالایی برخوردار نمی باشد و زاویه جریان حائز اهمیت است، می توان از لانه زنبوری با نسبت طول به قطر ۲ استفاده نمود. با این انتخاب، هزینه ساخت لانه زنبوری تا حدود ۶۰٪ کاهش یافته و مشکلات ساخت آن نیز کاهش می یابد.

## پی نوشت

1. Mikhailova
2. Lohrke
3. Scheiman
4. Brookst
5. Kulkarni
6. Guwahati
7. Set Up