



# بررسی عددی الگوهای تخریب ناشی از گردبادهای با حرکت انتقالی و نسبت چرخش کوچک

علیرضا رضوی<sup>۱</sup>، علی اشرفی‌زاده<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 ۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 \* ashrafizadeh@kntu.ac.ir، ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹، صندوق پستی

## چکیده

در این مقاله یک محفظه تولید گردباد آزمایشگاهی شبیه‌سازی و حل عددی جریان آشفته با به‌کارگیری مدلسازی گردابه‌های بزرگ، برای گردبادهای ساکن و با حرکت انتقالی، گزارش شده است. اعتبارسنجی حل عددی گردباد ساکن با نتایج آزمایشگاهی بیکر انجام شده، سپس اثر پارامترهای بیشینه سرعت باد، مدت زمان عبور سرعت‌های بیشینه و شتاب حرکت گردباد بر الگوی تخریب بررسی شده است. اولین نتیجه حاصل از حل عددی نشان از افزایش اثر تخریبی گردباد با افزایش ارتفاع می‌دهد. همچنین بیشترین میزان تخریب گردباد نزدیک به مرکز چرخش آن و در سمتی رخ می‌دهد که سرعت انتقالی موجب افزایش سرعت مماسی سیال می‌شود. با توجه به زیاد بودن شتاب در تمامی ارتفاعات، اثر این پارامتر در ساخت تمامی سازه‌ها، اعم از کوتاه و بلند، حائز اهمیت است. در مقابل، اثر اندازه سرعت و مدت زمان عبور سرعت‌های بیشینه بر الگوی تخریب سازه‌های بلند بیشتر از سازه‌های با ارتفاع کم و متوسط می‌باشد.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: ۰۲ مرداد ۱۳۹۲  
 پذیرش: ۲۳ مهر ۱۳۹۲  
 ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳  
 کلیدواژه‌ها:  
 گردباد  
 محفظه گردباد ورد  
 الگوهای تخریب  
 شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

## Numerical investigation on damage patterns of low swirl translating tornadoes

Alireza Razavi<sup>1</sup>, Ali Ashrafizadeh<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 19395-1999 Tehran, ashrafizadeh@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 24 July 2013  
 Accepted 15 October 2013  
 Available Online 13 July 2014

### Keywords:

Tornado  
 Ward-type tornado vortex chamber  
 Damage patterns  
 Large Eddy Simulation

### ABSTRACT

In this paper, numerical simulations of stationary and translating tornadoes are carried out using Ward-type simulator results and large eddy turbulence model. Validation for stationary case has been done with experimental work of Baker. The effects of peak winds, duration of intense winds and acceleration of translating tornado on damage patterns have been investigated. Results show that destruction is more intense at the side of the tornado that translational velocity and tangential wind velocity are added up. Moreover, peak wind velocity and duration of intense winds are important factors that have important effects on the destruction pattern of tall structures. However, the value of the translational acceleration of tornado is important for the design of all structures regardless of their heights.

شکل هسته گردباد و گردباد با چرخش چندگانه<sup>۲</sup> را در محفظه‌ای با یک ناحیه همگرایی شبیه‌سازی کنند.

جونز در ۱۹۷۳ پارامترهای هندسی و دینامیکی تاثیرگذار بر جریان گردباد را با استفاده از قضیه پی-باکینگهام<sup>۳</sup> به‌دست آورد<sup>۴</sup>. مهم‌ترین این پارامترها نسبت چرخش<sup>۵</sup>، عدد رینولدز شعاعی<sup>۶</sup> و نسبت منطری<sup>۷</sup> می‌باشند که به ترتیب با روابط (۱)، (۲) و (۳) بیان می‌شوند.

- 2- Multiple vortices
- 3- Buckingham  $\pi$ -theorem
- 4- Swirl ratio
- 5- Radial Reynolds number
- 6- Aspect ratio

### ۱- مقدمه

گردباد یکی از پدیده‌های طبیعی مخرب است که هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی به‌بار آورده و به همین دلیل مورد توجه عده زیادی از محققان قرار گرفته است<sup>[۲،۱]</sup>. یکی از اهداف مطالعه گردباد شناخت میدان جریان و در پی آن مقاوم‌سازی سازه‌های حساس چون بیمارستان‌ها، برج‌ها، نیروگاه‌های اتمی و ... است. مطالعه پدیده‌های مرتبط با گردباد با معرفی محفظه گردباد ورد<sup>[۳]</sup>، که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود وارد مرحله جدیدی شد. ورد توانست ویژگی‌های مهم گردباد چون پروفیل فشار سطحی، تغییر

1- Ward-type tornado vortex chamber

### Please cite this article using:

A.R. Razavi, A. Ashrafizadeh, Numerical investigation on damage patterns of low swirl translating tornadoes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 81-90, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ناچار از رعایت اعداد رینولدز یکسان بوده‌ایم. همچنین، همان‌طور که چرخ و همکارانش [۵] اشاره کرده‌اند، با افزایش عدد رینولدز شعاعی وابستگی ساختار گردباد به نسبت چرخش کاهش می‌یابد که این وابستگی در مقادیر حدود  $10^5$  بسیار کم می‌شود.

بیکر [۶] در رساله دکترای خود با استفاده از محفظه ورد مطالعات جامعی بر روی میدان جریان گردباد برای نسبت چرخش  $0.28$ ، نسبت منطری ۱ و دبی حجمی  $0.468$  متر مکعب بر ثانیه انجام داد. او پروفیل‌های سرعت مماسی، شعاعی و محوری را برای محدوده وسیعی از میدان‌های جریان درون محفظه به‌دست آورد.

ورمن و الکساندر [۷] تلاش کردند تا رابطه‌ای بین نتایج رادار داپلر با خسارات ایجاد شده در گردباد اسپنسر داکوتای جنوبی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۸ به‌دست آورند. آن‌ها، با قرار دادن نتایج رادار داپلر در مدل متقارن محوری همراه با حرکت انتقالی، پروفیل‌های سرعت شعاعی و مماسی را به‌دست آورده و اعلام کردند که الگوهای خسارت، علاوه بر وابستگی به بیشینه سرعت باد و نوع سازه‌ها، به عواملی چون مدت‌زمان بادهای شدید، شتاب‌ها، تغییرات جهت باد و اشیای حمل شده از بالادست نیز بستگی دارند. آن‌ها همچنین سعی کردند با استفاده از پروفیل‌های سرعت به‌دست آمده ارتباط این عوامل با خسارات ایجاد شده را نشان دهند و نتیجه گرفتند که حرکت انتقالی، عامل ایجاد عدم تقارن در میدان جریان گردباد است، به طوری که یک سمت گردباد سرعت‌های بیشتری را تجربه کرده و در نتیجه خسارات در همان سمت گردباد نیز شدیدتر است. نکته مهم دیگر این است که با توجه به این مورد که شدیدترین سرعت‌ها در ارتفاع کمتر از ۵۰ متری سطح زمین رخ می‌دهد، رادار قادر به شناسایی مکان دقیق و اندازه این سرعت‌ها نمی‌باشد. توضیح این نکته لازم است که امواج رادار به‌وسیله موانع زمینی متوقف شده و همچنین با فاصله گرفتن از منبع ارسال‌کننده، فاصله‌شان از سطح زمین بیشتر می‌شود و در نتیجه انحنای زمین را دنبال نمی‌کنند [۸].

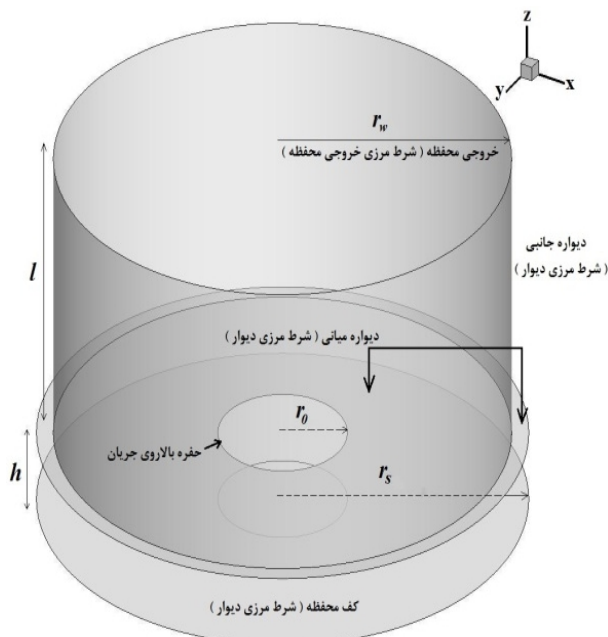
بیچ و همکارانش [۹] الگوهای افتادن درخت‌ها در گردباد کستلسیر<sup>۳</sup> اسپانیا در سال ۲۰۰۶ را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از مدل گردابه رنکین ترکیبی (شامل سرعت‌های مماسی و شعاعی) و افزودن سرعت انتقالی به آن سعی کردند تا ارتباط بین اندازه سرعت و این الگوها را پیدا کنند. آن‌ها با تغییر دو نسبت سرعت، که در معادلات (۴) و (۵) آمده‌اند، توانستند بردارهای سرعت به‌دست آمده را با الگوهای مشاهده شده از افتادن درخت‌ها مطابقت دهند.

$$G = \frac{U_\theta}{U_{trans}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{U_r}{U_\theta} \quad (5)$$

با توجه به پیچیدگی و پرهزینه بودن محاسبات عددی گردباد، تاکنون نتایج زیادی در این زمینه گزارش نشده و در اغلب موارد به تفسیر و توجیه داده‌های تصویری و راداری و نیز ارائه نتایج آزمایشگاهی بسنده شده است.

هدف این مقاله مطالعه عددی گردباد در مقیاس آزمایشگاهی و ارائه نتایجی در خصوص بررسی الگوهای خسارت ناشی از پارامترهای بیشینه سرعت باد، مدت‌زمان بادهای شدید و شتاب حرکت گردباد می‌باشد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با خسارات مشاهده شده در واقعیت، تأثیر و اهمیت این پارامترها را نشان داده و این نتایج می‌تواند در ساختن سازه‌های مقاوم در برابر گردباد مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱ محفظه گردباد ورد

جدول ۱ مقدار پارامترهای بی‌بعد در طبیعت و حل عددی حاضر

ردیف	پارامتر بی‌بعد	محدوده مقادیر در طبیعت	مقدار مورد استفاده در حل عددی
۱	نسبت هندسی ۱ $(\frac{r_s}{r_0})$	۲ تا ۵	۲/۸
۲	نسبت هندسی ۲ $(\frac{r_w}{r_0})$	۱/۵ تا ۴	۳/۵۴
۳	نسبت هندسی ۳ $(a' = \frac{h}{r_0})$	۰/۲ تا ۱	۱
۴	نسبت هندسی ۴ $(\frac{l}{h})$	۵ تا ۱۶	۴/۱۲
۵	نسبت چرخش $(S)$	۰/۰۵ تا ۲	۰/۲۸
۶	عدد رینولدز شعاعی $(Re_r)$	$10^9$ تا $10^{11}$	$1.04 \times 10^4$

$$S = \frac{\tan \theta}{2 \times a'} , \tan \theta = \frac{U_{\theta,0}}{U_{r,0}} \quad (1)$$

$$Re_r = \frac{Q}{2 \times \pi \times r \times \nu} \quad (2)$$

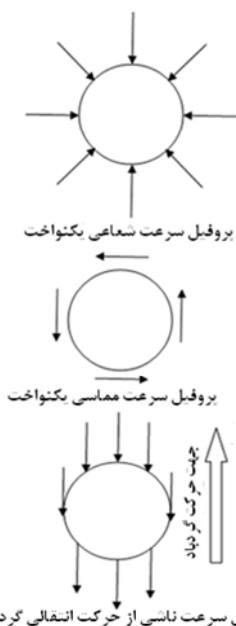
$$a' = \frac{h}{r_0} \quad (3)$$

چرخ و همکارانش [۵] با استفاده از محفظه ورد بررسی جامعی از گردباد با تغییر پارامترهای نسبت چرخش، عدد رینولدز شعاعی و نسبت منطری انجام دادند. مقادیر متداول این پارامترها و چند پارامتر هندسی مهم دیگر در گردبادهای طبیعی و نیز مدل عددی به‌کار گرفته شده در مقاله حاضر در جدول ۱ آورده شده است. اندازه‌گیری سرعت‌ها با بادسنج فیلم-داغ<sup>۱</sup> نشان داده است، که برای محدوده اعداد رینولدز شعاعی در نظر گرفته شده (از حدود  $5 \times 10^4$  تا حدود  $3/5 \times 10^5$ )، ساختار گردباد وابستگی ضعیفی به نسبت منطری دارد.

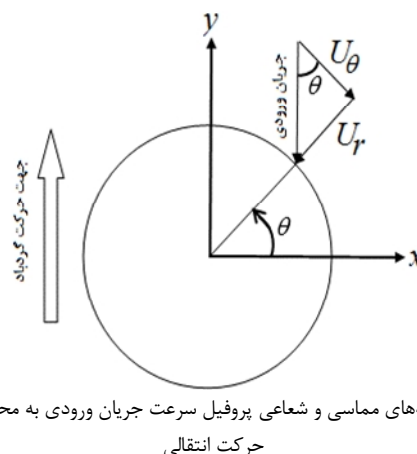
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نسبت هندسی ۴ در محدوده مقادیر طبیعی قرار ندارد که دلیل آن شبیه‌سازی محفظه آزمایشگاهی برای مقایسه نتایج است؛ اگرچه این مقدار به محدوده مقادیر طبیعت نزدیک است. مورد دیگر عدد رینولدز شعاعی است که مقدار آن بسیار کوچک‌تر از محدوده مقادیر در طبیعت است. برای مقایسه نتایج با حل آزمایشگاهی موجود بیکر،

1- Hot-film anemometer

2- Spencer, South Dakota  
3- Castellcir



شکل ۲ پروفیل‌های سرعت مماسی و شعاعی پروفیل سرعت جریان ورودی به محفظه ناشی از حرکت انتقالی



شکل ۳ پروفیل‌های سرعت مماسی و شعاعی پروفیل سرعت جریان ورودی به محفظه ناشی از حرکت انتقالی

جدول ۲ ابعاد دامنه حل عددی

پارامتر	طول (m)
$l$	۱/۶۵۲۴۲۹
$h$	۰/۴۰۱۰۷۵
$r_0$	۰/۴۰۱۰۷۵
$r_w$	۱/۴۲
$r_s$	۱/۵۲۵

## ۲- شبیه‌سازی عددی گردباد

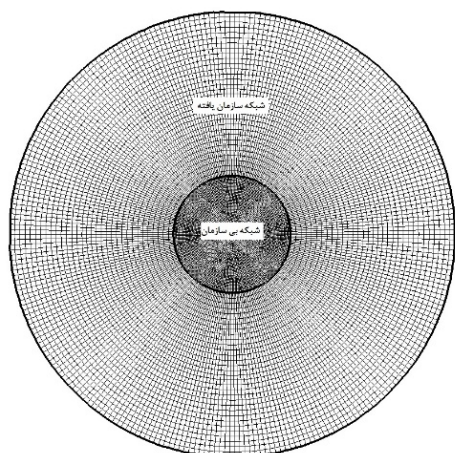
برای شبیه‌سازی عددی از مدل محفظه گردباد ورد و برای حل عددی از نرم‌افزار آنسیس فلونت<sup>۱</sup> استفاده شده است. ابعاد استفاده شده طبق جدول ۲ و برابر با مقادیر داده شده در رساله بیکر [۶] در نظر گرفته شده است. معادلات ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر برای سیال نیوتونی به‌عنوان معادلات حاکم بر جریان حل شده‌اند. از مدل جریان آشفته شبیه‌سازی گردبادهای بزرگ با به‌کارگیری مدل زیرشبکه اسماغورینسکی-لیلی دینامیک<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی آشفته‌گی استفاده شده است.

در شبیه‌سازی گردباد ساکن، سرعت مماسی و شعاعی در ورودی محفظه ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این مولفه‌ها طوری انتخاب شده‌اند که دبی حجمی و نسبت چرخش برابر با مقادیر استفاده شده در رساله بیکر به‌دست آیند (به ترتیب ۰/۴۶۸ متر مکعب بر ثانیه و ۰/۲۸). در شبیه‌سازی گردباد با حرکت انتقالی سرعت‌های ورودی به‌صورت نامتقارن در نظر گرفته شده و به‌جای حرکت حجم کنترل دربرگیرنده گردباد، اثر این حرکت بر تغییر توزیع دبی ورودی به محفظه لحاظ شده است.

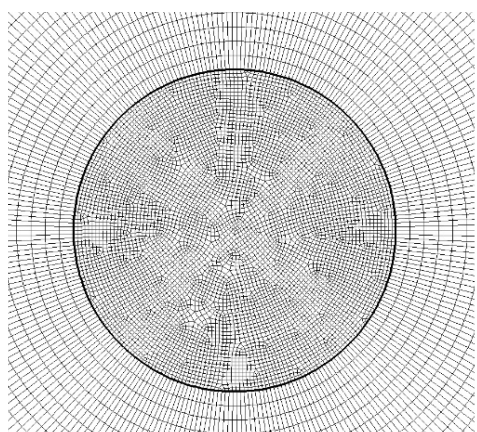
ابتدا شبیه‌سازی با استفاده از شرط مرزی جریان نامتقارن (معادلات (۶) و (۷) و شکل ۲) که ناشی از اضافه کردن مولفه سرعت در خلاف جهت حرکت گردباد می‌باشد (شکل ۳) انجام شده است. سپس پروفیل سرعت ارائه شده در معادله (۸)، در راستای حرکت به نتایج حاصل از حل اضافه شده است. ارتفاع مشخصه پروفیل سرعت انتقالی از تطابق آن با پروفیل سرعت شعاعی در شعاع ۰/۴ متر به‌دست آمده است. ناتاراجان نیز در رساله دکترای خود از همین مقدار استفاده کرده است [۱۰]. باید این نکته را در نظر داشت که در شبیه‌سازی گردباد متحرک، دبی و نسبت چرخش متوسط کماکان بدون تغییر می‌باشند (به ترتیب ۰/۴۶۸ مترمکعب بر ثانیه و ۰/۲۸).

$$U_r = -0.121775922 - 0.03825617415 \times \sin \theta \quad (۶)$$

$$U_\theta = 0.068383887 - 0.03825617415 \times \cos \theta \quad (۷)$$



شکل ۴ شبکه ایجاد شده در کف محفظه



شکل ۵ بزرگنمایی شبکه ایجاد شده در کف محفظه

$$U_{trans} = 0.03825617415 \times \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\frac{1}{7}}, z_0 = 0.025 \quad (۸)$$

## ۲-۱- شبکه محاسباتی

تمامی دامنه حل با سلول‌های ۶ وجهی گسسته‌سازی شده است. این شبکه

1- Ansys fluent  
2- Dynamic Smagorinsky-lilly

در انتها گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان برای زمان ضمنی و مرتبه دو، برای فشار از مرتبه دو و برای مومنتم به‌صورت تفاضل مرکزی انجام شده است.

### ۲-۲- بررسی استقلال نتایج از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی، ۴ شبکه در نظر گرفته شده است. مشخصات این شبکه‌ها در جدول ۳ آمده است.

در شکل ۹ پروفیل‌های عمودی سرعت در ۳ شعاع مختلف برای این بررسی مقایسه شده است. در شعاع ۴۰ سانتیمتر از مرکز محفظه مشاهده می‌شود که نتایج بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و نمی‌توان شبکه موردنظر را انتخاب کرد. فقط نتایج مربوط به شبکه ۱۵۰ کمی متمایز است. بدین منظور پروفیل‌های سرعت در شعاعی کوچک‌تر و نزدیک به مرکز محفظه بررسی شده است. در شعاع ۴/۱ سانتیمتر نتایج مربوط به شبکه ۱۵۰ کاملاً از نتایج دیگر شبکه‌ها جدا شده است که نشان از نامناسب بودن این شبکه دارد. اما نتایج ۳ شبکه دیگر هنوز نزدیک است و نمی‌توان با قطعیت شبکه‌ای را انتخاب کرد، پس به سراغ بررسی سرعت در مرکز محفظه می‌رویم. در اینجا پروفیل‌ها به طور کامل جدا شده‌اند و می‌توان با کنار گذاشتن شبکه ۲۴۰ انتخاب بهتری داشت. با توجه به شکل ۹ شبکه ۲۷۰ انتخاب شده است. دلیل انتخاب این شبکه این است که نتایج آن بسیار به نتایج شبکه ۳۰۰ نزدیک است. علاوه بر این، تعداد نودها و در نتیجه هزینه محاسباتی آن کمتر است.

### ۲-۳- اعتبارسنجی نتایج

نتایج حل عددی مستقل از شبکه برای گردباد ساکن که دارای مولفه‌های سرعت ورودی ثابت می‌باشد، با نتایج آزمایشگاهی بیکر مقایسه و در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که بین نتایج عددی و تجربی تطابق کیفی نسبتاً خوبی وجود داشته و بیشترین خطا مربوط به مولفه محوری سرعت است. در توجیه علل اختلاف بین مقادیر محاسباتی و تجربی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بیکر در رساله خود اعلام کرده است که برای کاهش آشفتگی در ورودی جریان، که ناشی از برخورد جریان با لبه ورودی محفظه می‌باشد، از مکش استفاده کرده است. بنابراین شرط مرزی سرعت محوری صفر در ورودی برقرار نبوده و این مقدار در واقع منفی است.

- بیکر اذعان کرده است که در آزمایش‌های وی اندازه‌گیری سرعت شعاعی و مماسی، دقیق‌تر از سرعت محوری صورت گرفته است.

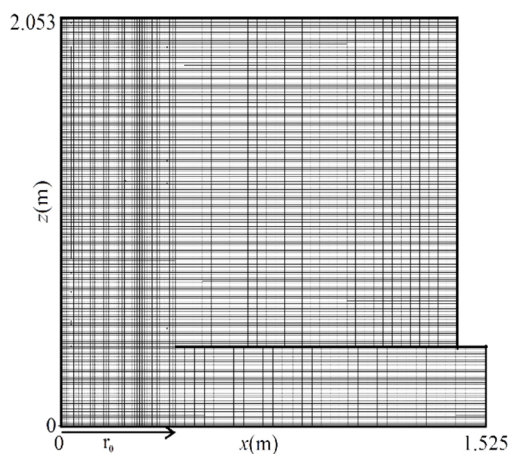
با توجه به نکات ذکر شده در مورد داده‌های تجربی، کیفیت سایر حل‌های عددی برای این مسئله خاص [۱۰، ۱۱] و این حقیقت که سایر مدل‌های توربولانس نتایج به مراتب ضعیف‌تری تولید می‌کنند، نتایج حاصل از حل عددی برای پیش‌بینی میدان جریان قابل قبول به نظر می‌رسند.

برای ارائه تصویر بهتری از میزان واقع‌نمایی حل عددی در این مطالعه، کانتور سرعت حاصل از حل عددی گردباد ساکن برای مقطع عمودی گذرنده از مرکز محفظه، با کانتور تجربی به‌دست آمده توسط بیکر در شکل ۱۱ مقایسه شده است. اندازه سرعت با استفاده از سرعت شعاعی ورودی در حالت گردباد ساکن (۰/۱۲۱۷۷۵۹۲۲ متر بر ثانیه) بی‌بعد شده است.

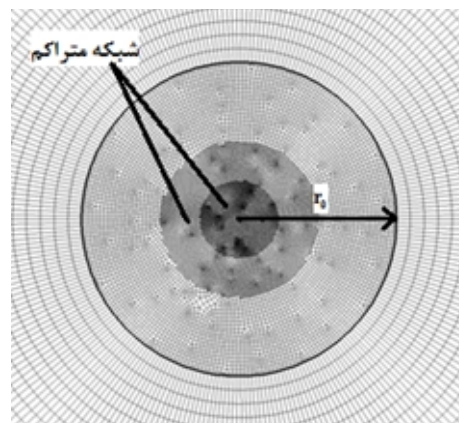
### ۲-۴- هزینه محاسباتی

هزینه محاسباتی شبیه‌سازی‌های انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است. زمان مورد نیاز شبیه‌سازی، به گام زمانی انتخاب شده بستگی دارد. برای کاهش زمان محاسبات، ابتدا حل ناپایا با استفاده از مدل جریان آشفتگی کی-اِپسیلون<sup>۱</sup> به‌دست آمده، سپس از این حل به‌عنوان شرط اولیه برای حل

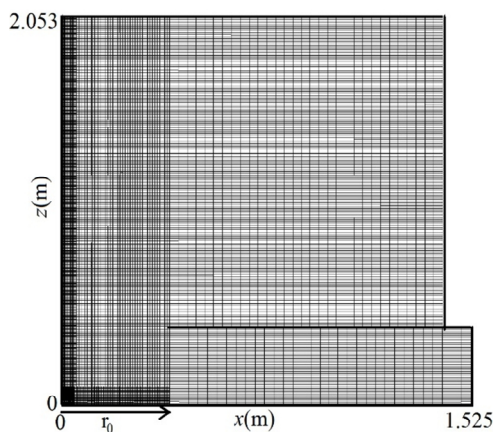
در استوانه مرکزی به شعاع حفره بالاروی بی‌سازمان و در خارج از آن سازمان‌یافته است (شکل‌های ۴ تا ۶). در نواحی مرکزی و کف محفظه از شبکه محاسباتی متراکم استفاده شده است (شکل‌های ۷ و ۸). همچنین در کف محفظه از شبکه مناسب برای مدلسازی لایه مرزی استفاده شده است.



شکل ۶ شبکه ایجاد شده (نمای جانبی محفظه)



شکل ۷ بزرگنمایی شبکه متراکم شده در کف محفظه



شکل ۸ شبکه متراکم شده (نمای جانبی محفظه)

جدول ۳ مشخصات شبکه‌های استفاده شده

ردیف	شماره شبکه	تعداد نودها
۱	۱۵۰	1052128
۲	۲۰۰	2419428
۵	۲۷۰	4281151
۶	۳۰۰	5112991

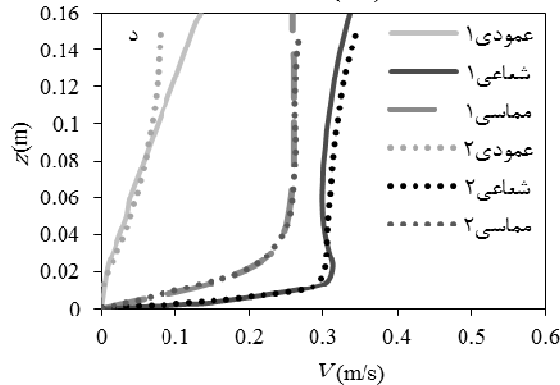
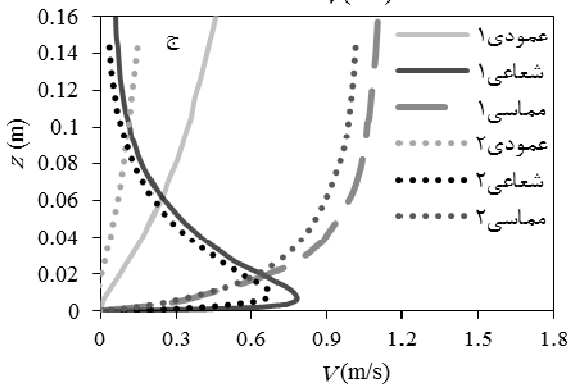
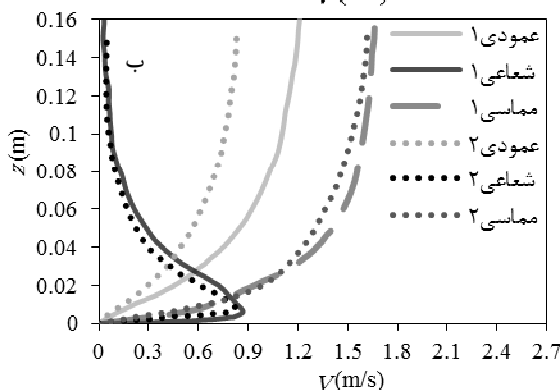
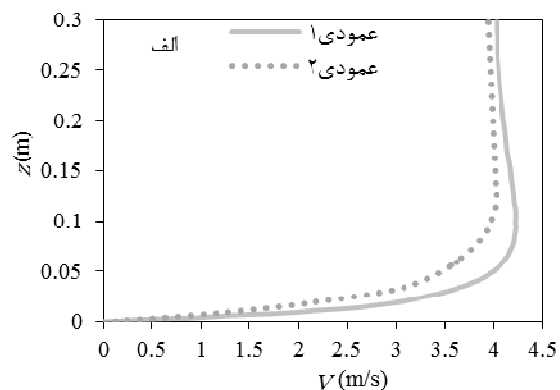
گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. قابل ذکر است که مقادیر آورده شده در جدول ۴، در حالت استفاده از ۷ هسته به صورت موازی به دست آمده‌اند.

### ۵-۲- نتایج

نتایج حاصل از حل عددی برای شبیه‌سازی گردبادهای ساکن و متحرک در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مقدار سرعت بی‌بعد در گردباد با حرکت انتقالی در تمامی ارتفاع‌ها بیشتر است.

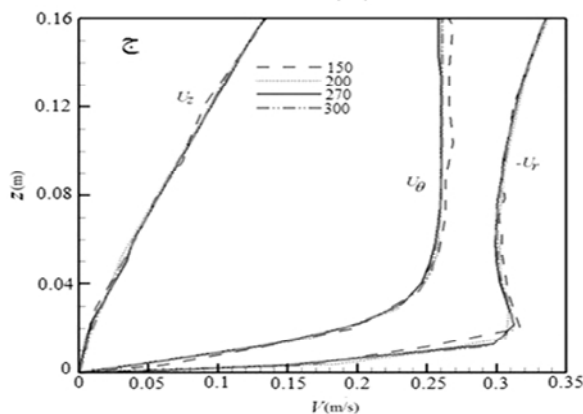
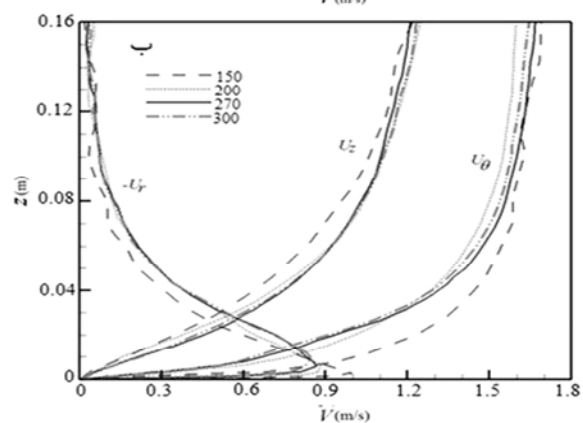
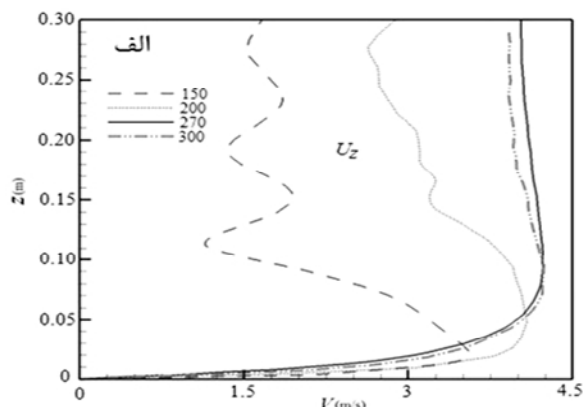
جدول ۴ هزینه و مشخصات حل عددی و سخت‌افزار استفاده شده

پارامتر	مقدار
تعداد نودهای شبکه محاسباتی	۴۲۸۱۱۵۱
بیشینه فضای حافظه اشغال شده	۸/۶۵ گیگابایت
زمان انجام شبیه‌سازی برای هر مورد	بیش از ۵۰۰ ساعت
مشخصات سی‌پی‌یو	Intel core i7-2600k
مشخصه رم	۳/۴ گیگاهرتز تا ۳/۸ گیگاهرتز
	باس ۱۶۰۰ مگاهرتز

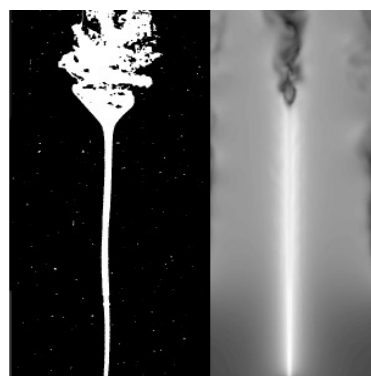
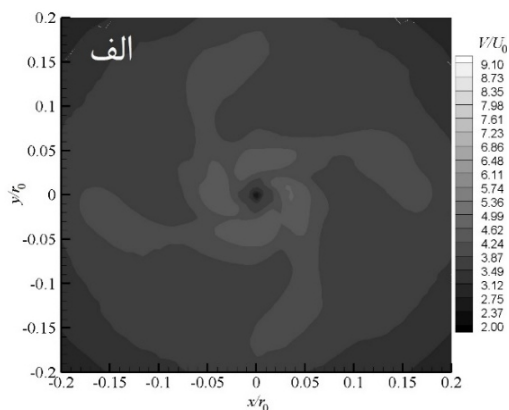


شکل ۱۰ اعتبارسنجی نتایج عددی با حل آزمایشگاهی بیکر [۷] (اعداد ۱ و ۲ پشت سرعت‌ها به ترتیب مربوط به نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌باشد- سرعت‌های شعاعی باید در ۱- ضرب شوند- الف:  $r=0.0m$ ; ب:  $r=0.041m$ ; ج:  $r=0.085m$ ; د:  $r=0.4m$ )

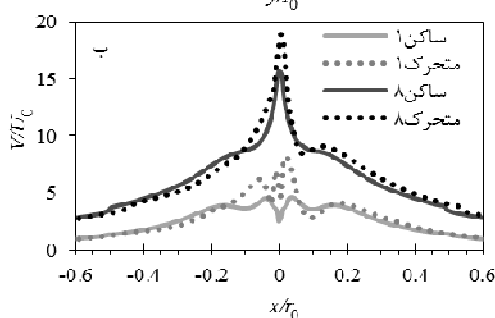
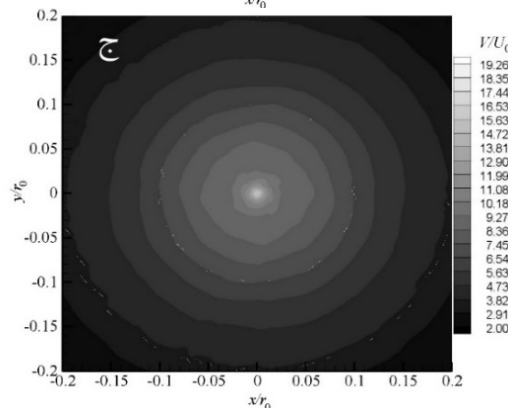
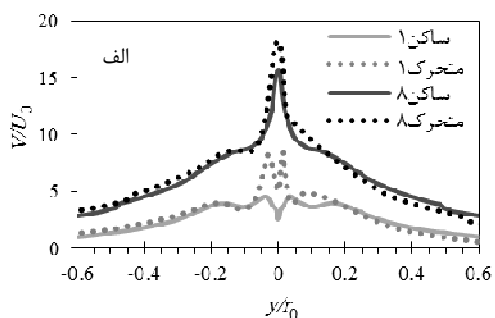
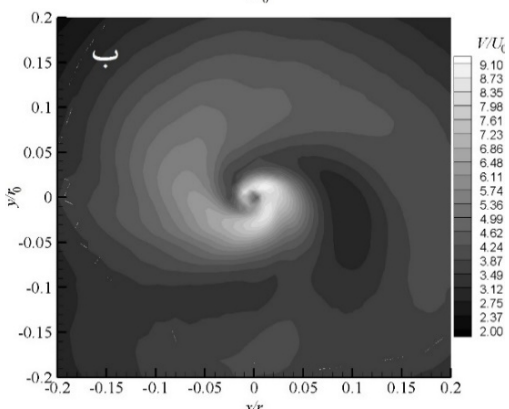
در حضور حرکت انتقالی، بیشینه سرعت‌های بی‌بعد در ارتفاع‌های ۱ و ۸ میلی‌متر، به ترتیب ۹۵/۷۰ و ۲۲/۹۱ درصد افزایش می‌یابد. این نشان دهنده این است که برای گردباد با حرکت انتقالی، درصد افزایش سرعت در ارتفاع‌های کمتر بسیار بیشتر است. به عبارت دیگر اثرات ناشی از حرکت انتقالی گردباد با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد.



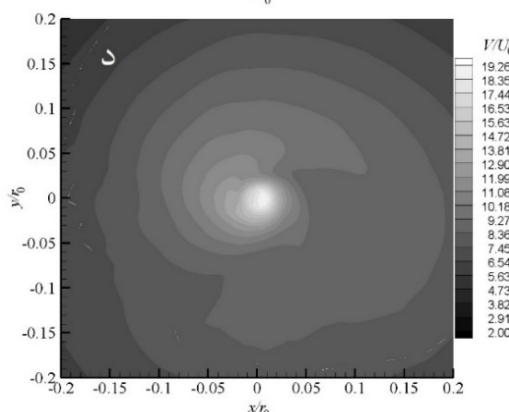
شکل ۹ بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی (الف:  $r=0.0m$ ; ب:  $r=0.041m$ ; ج:  $r=0.4m$ )



شکل ۱۱ مقایسه شکل جریان به دست آمده توسط بیکر [۷] (الف) با کانتور سرعت بی- بعد حاصل از حل عددی (ب)



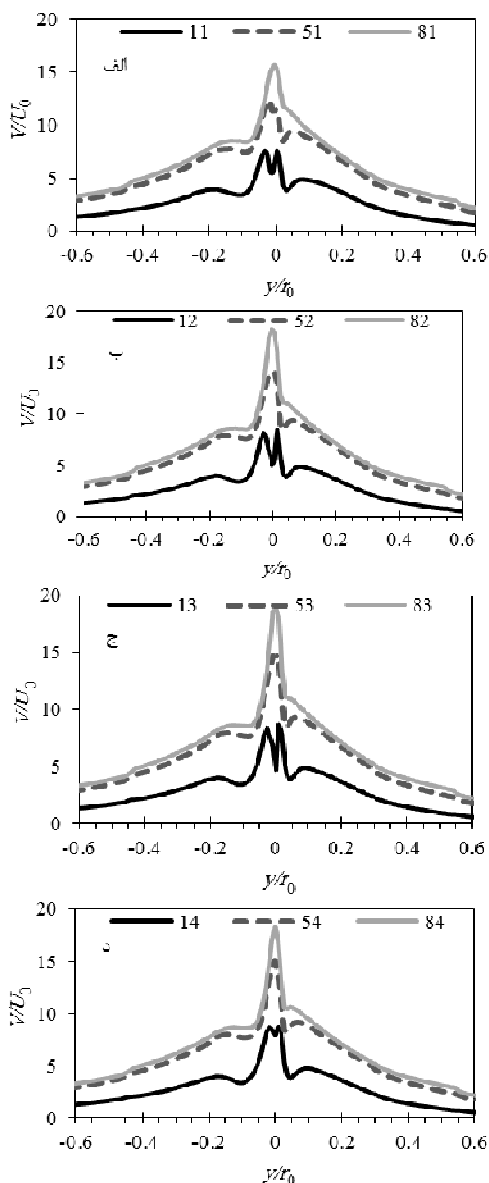
شکل ۱۲ پروفیل‌های سرعت گذرنده از مرکز چرخش گردبادهای ساکن و با حرکت انتقالی ( اعداد ۱ و ۸ ارتفاع اندازه‌گیری به میلی‌متر می‌باشد- الف:  $x=0$ , ب:  $y=0$ )



شکل ۱۳ کانتورهای سرعت برای صفحات افقی در دو حالت گردباد ساکن و گردباد با حرکت انتقالی؛ الف: گردباد ساکن، ارتفاع ۱ میلی‌متر، سرعت بیشینه نرمالیزه شده: ۴/۶۵؛ ب: گردباد متحرک، ارتفاع ۱ میلی‌متر، سرعت بیشینه نرمالیزه شده: ۹/۱۰؛ ج: گردباد ساکن، ارتفاع ۸ میلی‌متر، سرعت بیشینه نرمالیزه شده: ۱۵/۶۷؛ د: گردباد متحرک، ارتفاع ۸ میلی‌متر، سرعت بیشینه نرمالیزه شده: ۱۹/۲۶ (جهت حرکت گردبادهای متحرک به سمت بالا می‌باشد).

### ۳- الگوهای تخریب

در این قسمت اثر بیشینه سرعت باد، مدت زمان بادهای شدید و شتاب‌ها بر الگوهای تخریب گردباد با حرکت انتقالی بررسی شده است. باید دقت داشت که ارتفاع اغلب ساختمان‌های مسکونی کمتر از ۲۰ متر بوده و لذا باید با استفاده از مقیاس طول محفظه ورد، حداکثر ارتفاع مورد بررسی مشخص شود. چرخ و همکارانش [۵] ارتفاع ناحیه ورودی در طبیعت را بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر با مقدار غالب ۱۰۰۰ متر ذکر کرده‌اند. با در نظر گرفتن ارتفاع ورودی ۱۰۰۰ متر و توجه به ارتفاع بخش ورودی محفظه ورد در نظر گرفته شده که ۰/۴۰۱۰۷۵ متر می‌باشد، مقیاس طول برابر با ۲۴۹۲/۳ به دست می‌آید. با استفاده از این مقیاس، ارتفاع مطلوب مورد بررسی برای محفظه ورد در حدود ۰/۰۰۸ متر به دست می‌آید. از آنجا که در گردباد با حرکت انتقالی مرکز چرخش به سمت جنوب غربی (با فرض حرکت انتقالی گردباد به سمت شمال) کشیده می‌شود، برای انجام بررسی‌ها مبدا مختصات و محل جلوروی گردباد بر روی زمین، از تصویر کردن مرکز چرخش در ارتفاع ۰/۰۰۱ متر بر زمین به دست آمده است که مختصات آن نسبت به مرکز محفظه ورد (۰، ۰)  $(-0.0222927, -0.217499)$  می‌باشد (شکل ۱۴).

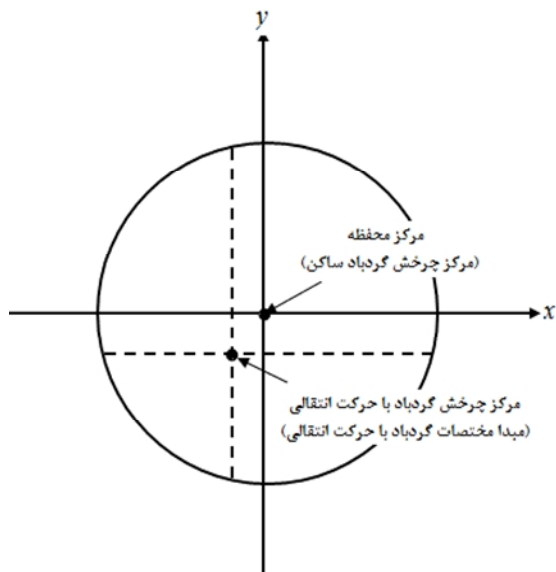


شکل ۱۶ اندازه سرعت نرمالیزه شده در راستای حرکت گردباد  
الف:  $x/r_0 = -0.012466$ ؛ ب:  $x/r_0 = 0$ ؛ ج:  $x/r_0 = 0.003455$ ؛ د:  $x/r_0 = 0.012466$

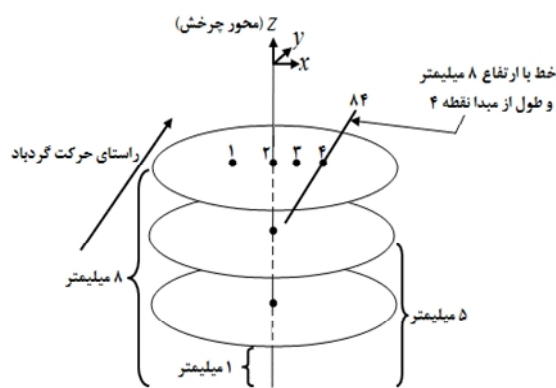
همان‌طور که در شکل ۱۶ مشخص است، در هر یک از نقاط در نظر گرفته شده سرعت سیال با افزایش ارتفاع افزایش پیدا می‌کند. بیشینه سرعت در راستای حرکت گردباد، برای تمامی طول از مبداها در ارتفاع ۸ میلی‌متر، که بیشترین ارتفاع در نظر گرفته شده است، اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۷ هر نمودار دامنه حل را در ارتفاع ثابت و در راستای حرکت گردباد، از طول از مبدهای منفی تا مقادیر مثبت جاروب می‌کند. مشاهده می‌شود که با حرکت به سمت راست گردباد (مقادیر مثبت طول از مبدا) مقادیر سرعت در تمامی ارتفاعها بیشتر می‌شود. بررسی سرعت در ارتفاعات تعیین شده نشان می‌دهد که بیشینه سرعت در نقطه‌ای با مختصات (۰/۰۰۸، ۰/۰۰۰۰۹۸، ۰/۰۰۱۳۸۵۹) نسبت به مرکز چرخش گردباد اتفاق می‌افتد. مقدار بی‌بعد این سرعت ۱۸/۹۲ می‌باشد.

### ۳-۲- مدت زمان بادهای شدید

برای بررسی مدت زمان بادهای شدید، سرعت بیشینه به‌عنوان معیار در نظر



شکل ۱۴ مبدا مختصات در نظر گرفته شده برای گردبادهای ساکن و با حرکت انتقالی



شکل ۱۵ نقاط در نظر گرفته شده برای بررسی الگوهای تخریب

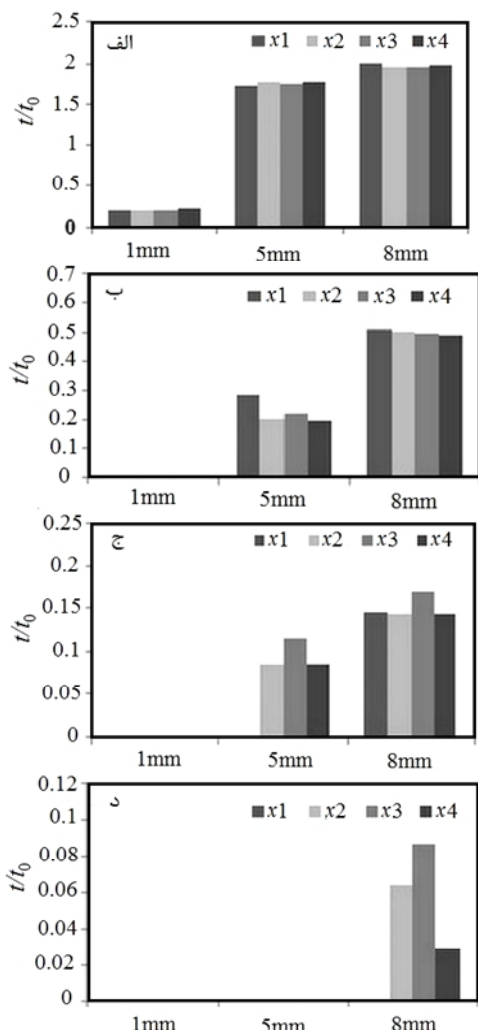
جدول ۵ مختصات نقاط در نظر گرفته شده

شماره نقطه	فاصله از مبدا (m)
۱	-۰/۰۰۵
۲	۰
۳	۰/۰۰۱۳۸۵۹
۴	۰/۰۰۵

### ۳-۱- بیشینه سرعت

برای بررسی مقادیر سرعت دامنه حل ۴ نقطه در نظر گرفته شده است. مختصات این نقاط در جدول ۵ آمده است. این نقاط در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.

پروفیل‌های سرعت برای این نقاط در چند ارتفاع در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است. سرعت‌ها با استفاده از مقدار سرعت شعاعی ورودی در حالت گردباد ساکن بی‌بعد شده‌اند. برای بی‌بعد کردن اندازه‌های طولی نیز از شعاع حفره بالاروی، که مقدار آن  $0.4 \times 10^{-7.5}$  متر می‌باشد، استفاده شده است. در اعداد دورقمی استفاده شده به‌عنوان علائم جدول، عدد اول ارتفاع به میلی‌متر و عدد دوم شماره نقطه است که طول از مبدا آن را مشخص می‌کند. به‌عنوان مثال عدد ۵۲ نشان‌دهنده این است که بررسی بر روی خطی در ارتفاع ۵ میلی‌متر، دارای طول از مبدائی برابر با نقطه ۲ انجام شده است. همچنین با بررسی معرف خط افقی نمودار، می‌توان فهمید که خط در کدام راستا (در راستای حرکت گردباد و یا عمود بر آن) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۸ مدت زمان عبور سرعت‌های بیشینه در ارتفاع و مقاطع مختلف به صورت بدون بعد ( الف: سرعت بی‌بعد کوچک‌تر از ۵/۶۷۶، ب: سرعت بی‌بعد کوچک‌تر از ۱۷/۰۲۸ (۹/۴۶، ج: سرعت بی‌بعد کوچک‌تر از ۱۳/۲۴۴، د: سرعت بی‌بعد کوچک‌تر از ۱۷/۰۲۸)

در شکل ۱۹ مقادیر شتاب در راستای گردباد و با جاروب کردن گردباد از چپ به راست، برای ارتفاع‌های مختلف، آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به مرکز چرخش گردباد، شتاب به شدت افزایش می‌یابد. در این ناحیه تغییر علامت‌های شتاب در تمامی ارتفاع‌ها دیده می‌شود. برخلاف سرعت، بیشینه اندازه شتاب با زیاد شدن ارتفاع افزایش پیدا نمی‌کند، بلکه مقدار آن با حرکت از ارتفاع ۱ میلی‌متر به سمت بالا ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند. دلیل این تغییرات را باید در شکل ۱۷، که مربوط به مقادیر سرعت‌ها می‌باشد، جویا شد. مشاهده می‌شود که در ارتفاع ۱ میلی‌متر دو قله سرعت با تغییرات سریع و ناگهانی سرعت وجود دارد که باعث افزایش شتاب می‌شود. با افزایش ارتفاع، قله‌های سرعت در یک نقطه متمرکز می‌شوند. در ارتفاع ۵ میلی‌متر این تغییر به‌طور کامل رخ نداده است و نقاط با تغییرات سریع سرعت مشاهده نمی‌شود؛ در نتیجه آن شتاب کاهش می‌یابد. اما با افزایش ارتفاع و رسیدن به ارتفاع ۸ میلی‌متر، مشاهده می‌شود که قله سرعت متمرکز شده و شیب منحنی و در نتیجه آن تغییرات سرعت شدید است، پس شتاب به‌دست آمده از آن نیز افزایش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی الگوهای جریان گردباد نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع سرعت به شدت

گرفته شده است. سپس مدت زمان بی‌بعدی که سرعت با عبور گردباد از هر یک از طول‌های مدنظر گرفته شده و در راستای حرکت گردباد بیش از ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد آن می‌باشد، به‌دست آمده است. این مقادیر در شکل ۱۸ آمده است.

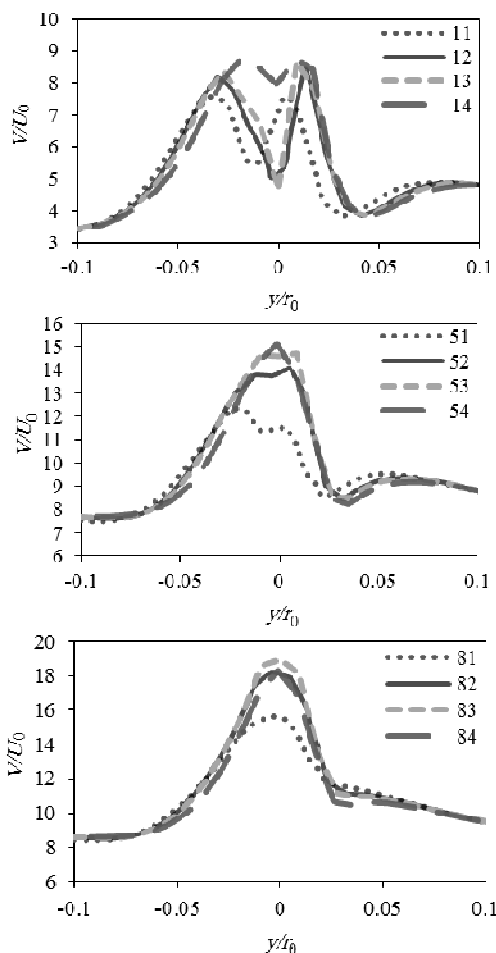
همان‌طور که در شکل ۱۸ مشخص است، مدت زمان عبور جریان‌های با سرعت بیشینه با افزایش ارتفاع گردباد افزایش می‌یابد. این مدت زمان در ارتفاع ۸ میلی‌متر بیشترین مقادیر را دارد. مدت زمان عبور جریان‌های با سرعت کمتر از ۳۰ درصد سرعت بیشینه، در نقاط مختلف برای یک ارتفاع خاص تقریباً یکسان است. با افزایش سرعت، در مقادیر میانی مدت زمان عبور در سمت چپ گردباد افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر سرعت، مدت زمان عبور سرعت‌های بیشینه در فاصله کمی از مرکز چرخش گردباد و در سمت راست آن بیشترین مقادیر را دارا می‌باشد.

#### ۳-۳- شتاب‌ها

در این قسمت شتاب‌ها در دامنه حل به‌دست آمده است. برای اندازه‌گیری شتاب‌ها از اندازه سرعت استفاده شده است. همچنین، مقادیر بی‌بعد زمان و شتاب، با به‌کارگیری مقادیر بی‌بعد موجود سرعت و طول در معادلات (۹) و (۱۰) به‌دست آمده‌اند.

$$t_0 = \frac{r_0}{U_0} = \frac{0.401075}{0.121775922} = 3.293549 \quad (9)$$

$$a_0 = \frac{U_0}{t_0} = \frac{0.121775922}{3.293549} = 0.036974 \quad (10)$$



شکل ۱۹ اندازه سرعت نرمالیزه شده در راستای حرکت گردباد برای ارتفاعات مختلف



در نتیجه، این عامل باید در ساخت تمامی سازه‌ها، اعم از کوتاه یا بلند، مورد توجه قرار گیرد.

بررسی الگوهای تخریب همچنین نشان می‌دهد که تخریب در سمتی از گردباد که سرعت مماسی در آنجا توسط حرکت انتقالی گردباد تقویت می‌شود شدیدتر است. باتوجه به شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸، در مشاهدات راداری و بررسی‌های انجام شده توسط ورمن [۷] در ارتباط با گردباد اسپنسر در داکوتای جنوبی نیز این نتیجه‌گیری تایید می‌شود.

### ۵- فهرست علائم

شتاب ( $m/s^2$ )	$a$
شتاب مرجع ( $m/s^2$ )	$a_0$
نسبت منطری	$d$
نسبت سرعت مماسی به سرعت انتقالی	$g$
ارتفاع ورودی محفظه (m)	$h$
ارتفاع دیواره ناحیه استوانه‌ای بالای محفظه (m)	$l$
دبی حجمی بر واحد ارتفاع ( $m^2/s$ )	$Q$
عدد رینولدز شعاعی	$Re_r$
شعاع کف محفظه (m)	$r_s$
شعاع خروجی محفظه (m)	$r_w$
شعاع حفره بالاروی جریان (m)	$r_0$
نسبت چرخش	$s$
زمان مرجع (s)	$t_0$
سرعت شعاعی (m/s)	$U_r$
سرعت شعاعی متقارن ورودی محفظه (m/s)	$U_{r,0}$
سرعت انتقالی (m/s)	$U_{trans}$
سرعت محوری (m/s)	$U_z$
سرعت مماسی (m/s)	$U_\theta$
سرعت مماسی در ورودی محفظه (m/s)	$U_{\theta,0}$
اندازه‌ی سرعت (m/s)	$v$
ارتفاع مرجع (m)	$z_0$

### علائم یونانی

نسبت سرعت شعاعی به سرعت مماسی	$\alpha$
ویسکوزیته سینماتیکی ( $m^2/s$ )	$\nu$
زاویه ورود جریان (rad)	$\theta$

### ۶- مراجع

[1] Annual U.S. Killer Tornado Statistics, accessed 29 December 2012, <http://www.spc.noaa.gov/climo/torn/fataltorn.html>.

[2] Total cost of damage, accessed 29 December 2012, [http://www.Statemaster.com/graph/geo\\_tor\\_tot\\_cos\\_of\\_dam-geography-tornadoes-total-cost-damage](http://www.Statemaster.com/graph/geo_tor_tot_cos_of_dam-geography-tornadoes-total-cost-damage).

[3] N. B. Ward, The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 29, pp. 1194-1204, 1972.

[4] R. P. Davies-Jones, The dependence of core radius on swirl ratio in a tornado simulator, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 30, pp. 1427-1430, 1973.

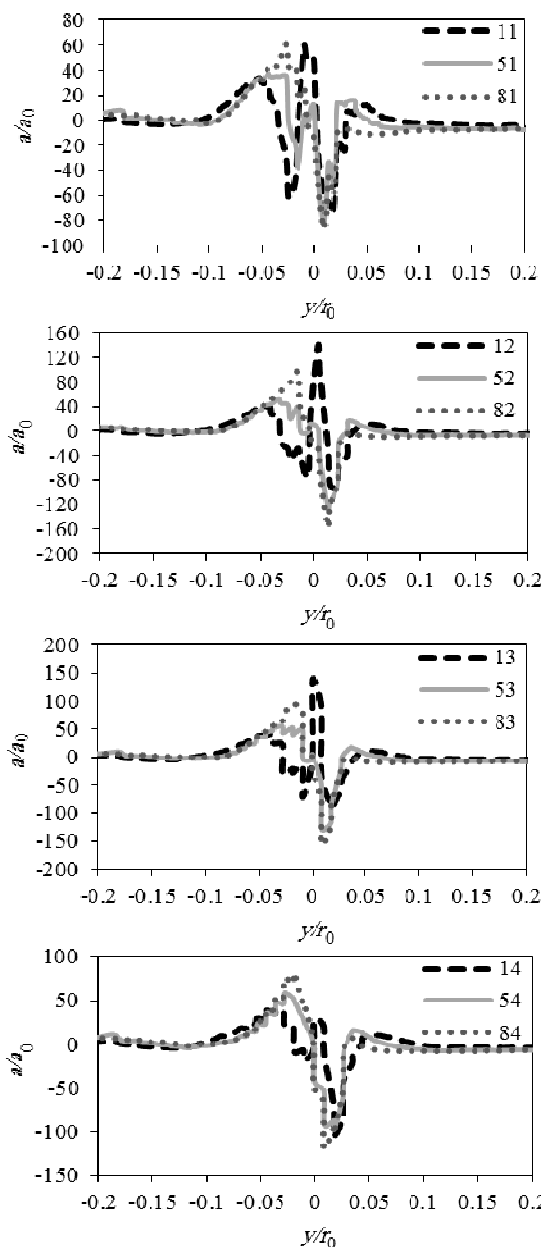
[5] C. R. Church, J. T. Snow, G. L. Baker, E. M. Agee, Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: a laboratory investigation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 36, pp. 1755-1776, 1979.

[6] G. L. Baker, *Boundary layers in laminar vortex flows*, PhD Thesis, West Lafayette, Indiana, Purdue University, 1981.

[7] J. Wurman, C. R. Alexander, The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part II: comparison of observed damage and radar-derived winds in the tornadoes, *Monthly weather review*, Vol. 133, pp. 97-119, 2005

افزایش پیدا می‌کند، به طوری که اندازه آن در ارتفاع ۸ میلیمتر بیش از ۲ برابر این اندازه در ارتفاع ۱ میلیمتر می‌باشد. با استفاده از مقیاس طول ۱۰۰۰ متر ذکر شده توسط چرچ و همکارانش [۵]، سازه‌ای با ارتفاع حدود ۲۰ متر در قسمت‌های بالایی سرعتی بیش از ۲ برابر مقادیر سرعت در قسمت پایین را تجربه می‌کند. افزایش ارتفاع تاثیر شدیدی بر مدت زمان عبور سرعت‌های بیشینه نیز دارد و آن را به شدت افزایش می‌دهد. سازه‌های با ارتفاع بیشتر و یا طبقات بالاتر ساختمان‌ها مدت زمان بیشتری سرعت‌های شدید گردباد را تجربه می‌کنند. شتاب تنها موردی است که در این بررسی به‌طور پیوسته افزایش پیدا نمی‌کند و مقدار آن در ارتفاع‌های کم نیز زیاد است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، در ساخت سازه‌های بلند در مناطقی که احتمال عبور گردباد وجود دارد، باید بررسی‌های لازم برای مقاوم‌سازی آن‌ها در برابر سرعت‌های شدید و مدت زمان نسبی طولانی عبور آن‌ها صورت گیرد. باید توجه داشت که جریان‌های حول سازه‌های کوتاه و طبقات پایین ساختمان‌ها نیز شتاب‌های شدیدی را تجربه می‌کنند.



شکل ۱۹ شتاب نرمالیزه شده در راستای حرکت گردباد

- [10] D. Natarajan, *Numerical simulation of tornado-like vortices*, PhD Thesis, London, Ontario, Canada, The University of Western Ontario, 2011.
- [11] T. Wilson, *Vortex Boundary Layer Dynamics*, MSc. Thesis, University of California Davis, 1981.
- [8] F. L. Haan Jr, P. P. Sarkar, W. A. Gallus, Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications, *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 1146-1159, 2008
- [9] J. Bech, M. Gaya, M. Aran, F. Figuero, J. Amaro, J. Arus, Tornado damage analysis of a forest area using site survey observations, radar data and a simple analytical vortex model, *Atmospheric Research*, Vol. 93, pp. 118-130, 2009