Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.7 Núm.4 16 de mayo - 29 de junio, 2016 p. 821-832

Análisis de coeficientes de la fuerza del viento y comportamiento del flujo sobre un modelo de invernadero*

Analysis coefficients wind force and flow behavior on a greenhouse model

Vicente López Bautista[1§], Carlos Alberto Villaseñor Perea[2], Gilberto de Jesús López Canteñs[2], Mauricio Carrillo García[3] y Rocio Cervantes Osornio[4]

[1]Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México. Tel: 5542956796. [2]Universidad Autónoma Chapingo, Departamento Ingeniería Mecánica Agrícola, km 38.5 carretera México-Texcoco 56230 Chapingo, Estado de México, México, C. P. 56230, (karlosvilla06@yahoo.com.mx; alelopez10@hotmail.com). [3]Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México, C. P. 56230, 01 595 95 2 1551. [4]INIFAP- Campo Experimental Valle de México, km 18.5 Carretera México-Lechería, C. P. 56230, A.P. 10, Estado de México. (rcervanteso@colpos.mx). [§]Autor para correspondencia: vicentlop271011@gmail.com.

Resumen

Los invernaderos usualmente se construyen con marcos de metal cubiertos con plástico y además son estructuras ligeras, por lo cual son sensibles a las cargas dinámicas tales como la carga de viento. En este trabajo se analiza el comportamiento aerodinámico de un modelo de invernadero con ventila cenital, a través de la determinación de las presiones locales en túnel de viento utilizando un modelo a escala, considerando distintas direcciones del viento. El flujo de aire sobre un invernadero es un fenómeno complejo, debido a esto se visualizó el comportamiento del flujo de aire alrededor del modelo por medio de inyección de humo y el resultado se comparó con una simulación realizada en un software de elemento finito (CFD) para obtener una validación de la distribución del flujo; los coeficientes de la fuerza del viento fueron determinados y comparados con los valores reportados en algunos países; corroborando el estudio. Se espera que los resultados presentados sean útiles para el desarrollo de futuras investigaciones, así como para garantizar la seguridad mecánica de las estructuras y ser un referente para la industria de la construcción de invernaderos.

Abstract

The greenhouses are usually constructed with plastic frames covered with metal and are also lightweight structures, which are sensitive to dynamic loads such as wind load. In this work the aerodynamic behavior of a model greenhouse with overhead vent is analyzed through the determination of local pressure wind tunnel using a scale model, considering different wind directions. Airflow on a greenhouse is a complex phenomenon, because this behavior airflow around the model was visualized by injection of smoke and the result was compared with a simulation performed on a software finite element (CFD) for a validation of the flow distribution; coefficients wind strength were determined and compared with values reported in some countries; corroborating the study. It is expected that the results will be useful for future research, and to ensure the mechanical safety of structures and be a benchmark for the industry of building greenhouses.

Keywords: CFD, downforce, greenhouse, simulation, smoke, wind tunnel.

* Recibido: enero de 2016
Aceptado: mayo de 2016

Palabras clave: carga aerodinámica, CFD, humo, invernadero, túnel de viento, simulación.

Introducción

Varios autores han puesto en manifiesto que los invernaderos se construyen en ausencia de proyecto de construcción, únicamente basándose en la experiencia y conocimiento local de las empresas constructoras (Briassoulis *et al*., 1997; Grafiadellis, 1999; Von Elsner *et al*., 2000; Kendirli, 2005; Yasemin-Emekli, 2010; Briassoulis *et al*., 2010). En el pasado, el desarrollo y diseño de invernaderos se basó principalmente en la experiencia (Von Elsner *et al*., 2000). Todos ellos coinciden en la necesidad de diseñar los invernaderos de acuerdo a normativas vigentes, o acordes a las condiciones climáticas de la zona, fundamentalmente atendiendo las cargas del viento y de la nieve. El bajo peso propio de los invernaderos los hace especialmente vulnerables a los vientos fuertes; eventos en los que sufren daños que van desde arrancamientos hasta el colapso total, según se ha podido constatar en reiteradas oportunidades.

Por ejemplo, el viento genera variaciones de presión sobre la cubierta del invernadero y esfuerzos correspondientes en el marco y cimientos, los cuales pueden causar daño en caso de velocidades de viento extremo. Para este caso la presión del viento se calculó como una función del coeficiente de presión correspondiente al segmento de cubierta en consideración y la presión dinámica del viento. Las cargas de viento aparecen como fuerzas de presión y succión sobre la superficie de invernadero. La presión dinámica del viento depende de la altura efectiva del invernadero, la cual se define como la distancia entre el nivel del suelo, la altura promedio y el punto más alto del techo (Von Elsner, 2000; ENV, 2002; Subramani and Sugathan, 2012).

Una de las fuerzas más destructivas alrededor de un invernadero es el viento; las cargas del viento pueden calcularse por la presión de flujo libre, multiplicada por el coeficiente de la fuerza del viento. Los coeficientes de la fuerza del viento dependen de la dirección, forma del invernadero, tamaño, y presencia o ausencia de ventilas y rompe vientos. Generalmente, pueden ser determinados en experimentos en túnel de viento. Los valores reportados en algunos países muestran diferencias, debido a las condiciones experimentales. En particular, los invernaderos revestidos con plástico son estructuras muy ligeras y frecuentemente experimentan daños debido a tormentas de viento. El

Introduction

Several authors have shown that greenhouses are built in the absence of construction project solely based on experience and local knowledge of construction companies (Briassoulis *et al*., 1997; Grafiadellis, 1999; Von Elsner *et al*., 2000; Kendirli, 2005; Yasemin-Emekli, 2010; Briassoulis *et al*., 2010). In the past, the development and design of greenhouses was mainly based on experience (Von Elsner *et al*., 2000). They all agree on the need to design conservatories according to regulations, or in line with the climatic conditions of the area, primarily serving the wind loads and snow. The very low weight of the greenhouses makes them especially vulnerable to high winds; events in those suffering damage ranging from avulsion to total collapse, as has been noted repeatedly.

For example, the wind generates pressure variations on the greenhouse cover and corresponding efforts in the framework and foundations, which can cause damage in case of extreme wind speeds. For this case the wind pressure is calculated as a function of the pressure coefficient corresponding housing segment into consideration and the dynamic pressure of wind. Wind loads appear as pressure and suction forces on the surface emissions. The wind dynamic pressure depends on the effective height of the greenhouse, which is defined as the distance between the ground level, the average height and the highest point of the roof (Von Elsner, 2000; ENV, 2002; Subramani and Sugathan, 2012).

One of the most destructive forces around a greenhouse is the wind; wind loads can be calculated by the free flow pressure multiplied by the coefficient of the wind. Coefficients depend on the wind direction, so the greenhouse, size, and presence or absence of vents and windbreaks. Generally, they can be determined in experiments in wind tunnel. The reported values show differences in some countries due to the experimental conditions. In particular, greenhouses covered with plastics are very light structures and often experience damage from windstorms. The wind pressure coefficient is used in the design of the greenhouses to improve the structures thereof. The appropriate estimate of the distribution coefficient wind pressure depends on the shape of the structure, measurements at full scale, dynamic analysis computational fluid and testing wind tunnel for different types of greenhouses covered with plastics (Hoxey *et al*., 1984; ASAE Standards, 1987; Mathews *et al*., 1987; Mistriotis *et al*., 2002; Robertson *et al*., 2002; Brugger *et al*., 2005; Allori *et al*., 2011). Moriyama *et al*. (2010) conducted a wind tunnel test to obtain the distribution coefficient of wind pressure on a greenhouse.

coeficiente de presión del viento es usado en el diseño de los invernaderos, para mejorar las estructuras de los mismos. La estimación apropiada de la distribución del coeficiente de presión del viento depende de la forma de la estructura, mediciones a escala completa, análisis dinámico de fluidos computacionales y pruebas de túnel de viento para diferentes tipos de invernaderos revestidos de plástico (Hoxey *et al*., 1984; ASAE Standards, 1987; Mathews *et al*., 1987; Mistriotis *et al*., 2002; Robertson *et al*., 2002; Brugger *et al*., 2005; Allori *et al*., 2011). Moriyama *et al*. (2010) realizaron una prueba de túnel de viento para obtener la distribución del coeficiente de presión del viento sobre un invernadero.

Debe ser notado que varias normas adoptan diferentes aproximaciones para el cálculo de las cargas de viento. Como resultado las cargas de diseño pueden diferir significativamente. Dependiendo de la forma geométrica de la construcción los coeficientes de presión aerodinámicos deben considerase para la superficie de cada sector de la estructura.

El propósito de este estudio fue determinar los coeficientes de la fuerza del viento sobre un tipo de invernadero con ventila cenital típico en la zona central de México, mediante la construcción de un modelo a escala, instrumentado con tomas de presión en una prueba de túnel de viento; los resultados obtenidos se consideran de gran utilidad para la optimización de las estructuras de los invernaderos, así como para garantizar la seguridad mecánica, además fueron comparados con los valores reportados por otros estudios, también se muestran los resultados de la carga aerodinámica por unidad de superficie usando los resultados de los coeficientes de presión promedio y la visualización del patrón de flujo de aire alrededor de la estructura. La realización del estudio por medio del método de elemento finito, tuvo la finalidad de comparar los resultados de los coeficientes y distribución de carga de viento, obtenidos en el ensayo de túnel de viento.

Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en el marco de la metodología presentada por Barlow *et al*. (1999) en el túnel de viento PA-2ZU de succión, con sección de prueba de 1.2 x 1.2 x 2.4 m en la escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Ticoman. El túnel de viento desarrolló una velocidad del viento de 95.34 km h^{-1}. El modelo a escala de un invernadero común construido en México fue de 1:100 con 22 tomas de presión como se muestra en la Figura 1. El correspondiente modelo a escala completa tiene dimensiones de 7.5 m de

It should be noted that several standards adopted different approaches for calculating wind loads. As a result the design loads may differ significantly. Depending on the geometric shape of the aerodynamic coefficients construction must consider for the pressure surface of each sector structure.

The purpose of this study was to determine the coefficients of the wind on a type of greenhouse with typical overhead vents in the central area of Mexico, by building a scale model, instrumented with pressure taps in a tunnel test wind; the results are considered very useful for optimizing the structures of the greenhouses, and to ensure the mechanical safety also were compared with values reported by other studies, the results of downforce are also displayed per unit area using the results of the coefficients of average pressure and pattern display airflow around the structure. The study by the finite element method, was intended to compare the results of the coefficients and distribution of wind load, obtained in the wind tunnel test.

Materials and methods

The tests were conducted in the framework of the methodology presented by Barlow *et al*. (1999) in the wind tunnel PA-2ZU suction with test section of 1.2 x 1.2 x 2.4 m in high school of Mechanical and Electrical Engineering, Unit Ticoman. The wind tunnel developed a wind speed of 95.34 km h^{-1}. The scale model of a common greenhouse built in Mexico was 1:100 with 22 pressure taps as shown in Figure 1. The corresponding full scale model has dimensions of 7.5 m wide, 6.22 m high crest and 42 m in length; the stagnation effect on the pressure distributions was considered insignificant (Jensen *et al*., 1995).

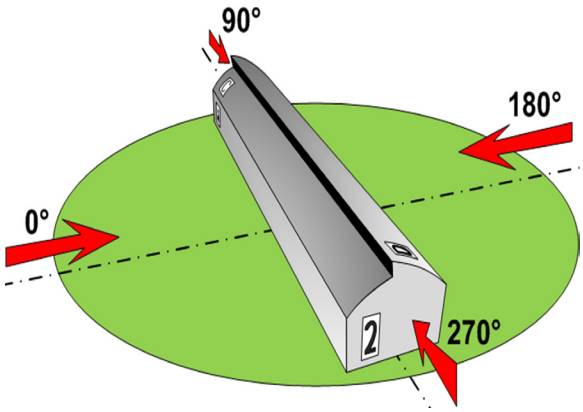


Figura 1. Definición de los valores de la dirección del viento.
Figure 1. Definition of the values of the wind direction.

ancho, 6.22 m de altura a la cresta y 42 m de longitud; el efecto de estancamiento sobre las distribuciones de presión fue considerada insignificante (Jensen *et al*., 1995).

El modelo fue hecho de madera, se realizaron mediciones para 4 posiciones angulares con respecto a la dirección del viento a 0, 90, 180 y 270° (Figura 1); las superficies del modelo están definidas en la Figura 2.

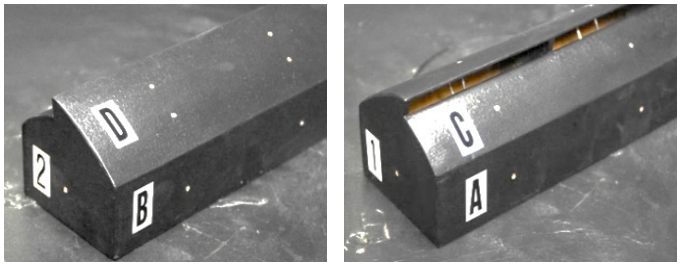


Figura 2. Identificación de las superficies del modelo.
Figure 2. Identification of model surfaces.

Las condiciones ambientales promedios durante la prueba fueron las siguientes (Cuadro 1).

Para la medición de las presiones locales se utilizaron tomas de presión conectadas mediante tubos capilares de PVC, manómetros multicolumna. El perfil de la velocidad media del viento a una altura de 1 m en el centro de la mesa giratoria del túnel de viento fue medido por un anemómetro (modelo IFA300, TSI, Inc.). La influencia del número de Reynolds sobre la presión del viento se asumió despreciable (Building Center of Japan, 1994). El ensayo se llevó a cabo sin simulación de capa límite terrestre. El coeficiente de presión del viento puede ser definido como sigue (Ecuación 1):

$$C_p = \frac{P - P_s}{qh} \qquad 1)$$

$$qh = \frac{1}{2 * \rho * U_H^2}$$

Donde: C_p= el coeficiente de presión del viento; p= la presión que actúa sobre el modelo (N m^{-2}); P_s= la presión estática sobre el túnel de viento (N m^{-2}); q_h= la presión de flujo libre (N m^{-2}); ρ= la densidad del aire (kg m^{-3}); U_H= la velocidad del viento a la altura de referencia (m s^{-1}).

La presión estática fue medida por un tubo de Pitot localizado en un punto a 3.5 m adelante del centro de la mesa giratoria. Los coeficientes estimados en la dirección del viento a 0, 90, 180 y 270° (Figura 3), fueron comparados con los valores provistos por ASAE (1976); JGHA (1981); ANSI (1982) y Nelson (1988).

The model was made of wood, for 4 measurements were performed angular positions with respect to the wind direction to 0, 90, 180 and 270° (Figure 1); model surfaces are defined in Figure 2.

The environmental conditions during the test averages were as follows (Table 1).

Cuadro 1. Condiciones ambientales durante la prueba.
Table 1. Environmental conditions during the test.

Parámetro	Valor promedio
Temperatura ambiente	19.6 °C
Presión atmosférica	587.5 mmHg
Humedad relativa	79%
Densidad del aire	0.923 kg m^{-3}

For measurement of local pressures pressure taps connected by capillaries PVC, multicolumn manometers were used. The profile of the average wind speed at a height of 1 m in the center of the turntable wind tunnel was measured by an anemometer (IFA300 model, TSI, Inc.). The influence of Reynolds number on the wind pressure was assumed negligible (Building Center of Japan, 1994). The test was carried out without boundary layer terrestrial simulation. The coefficient of wind pressure can be defined as follows (Equation 1):

$$C_p = \frac{P - P_s}{qh} \qquad 1)$$

$$qh = \frac{1}{2 * \rho * U_H^2}$$

Where: C_p= coefficient of wind pressure; p= the pressure acting on the model (N m^{-2}); P_s= static pressure on the wind tunnel (N m^{-2}); q_h= free flow pressure (N m^{-2}); ρ= air density (kg m^{-3}); U_H= wind speed at reference height (m s^{-1}).

The static pressure was measured by a pitot tube located at a point 3.5 m below the center of the turntable. The estimated coefficients in the wind direction to 0, 90, 180 and 270° (Figure 3), were compared with the values provided by ASAE (1976); JGHA (1981); ANSI (1982) and Nelson (1988).

Pattern display airflow

The airflow around a structure is complex and difficult to understand the flow field only from the distribution of the pressure coefficients. For a better appreciation of the

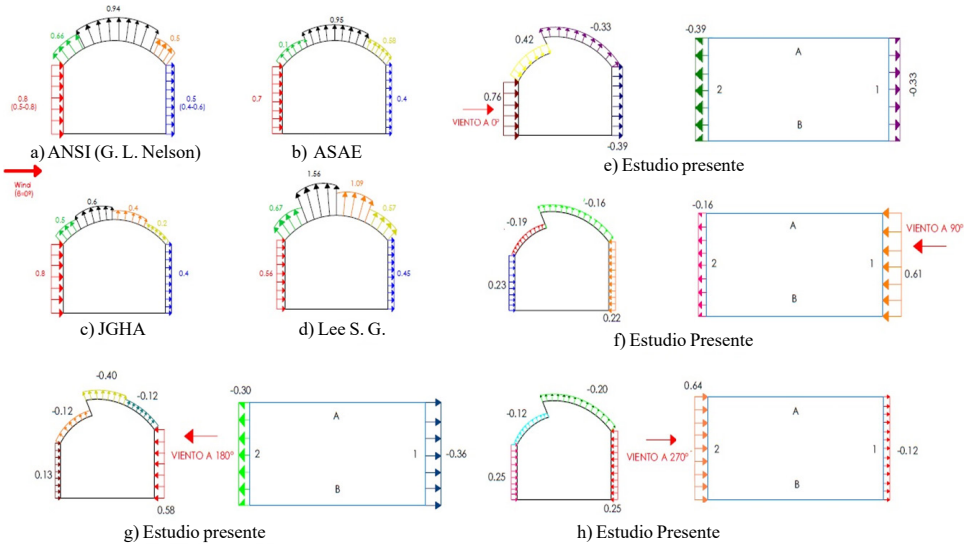


Figura 3. Comparación de los diferentes resultados de los coeficientes de presión.
Figure 3. Comparison of the different results of pressure coefficients.

Visualización del patrón de flujo de aire

El flujo de aire alrededor de una estructura es complejo, y es difícil de entender el campo de flujo solamente a partir de la distribución de los coeficientes de presión. Para una mejor apreciación de la relación entre el flujo de aire y la geometría del invernadero, se realizó la visualización por medio de inyección de humo en dos y tres dimensiones:

1) Visualización del flujo en 2D. En este método no se considera la influencia de los extremos del modelo, las caras 1 y 2 coinciden con las paredes de la sección del túnel de viento (Figura 2).

2) Visualización del flujo en 3D. Al igual que en los coeficientes de presión, las superficies del modelo para flujo en 3D están definidas como se indica en la Figura 3. Para la visualización del flujo se utilizó una video cámara comercial Sony SLT A77 V Co., Ltd., y un generador e inyector de humo de alta velocidad.

La carga por unidad de superficie se obtiene con la Ecuación 2:

$$P = q * C_p \qquad 2)$$

Donde: P= la carga aerodinámica por unidad de superficie (N m^{-2}); y q= la presión dinámica del flujo libre (N m^{-2}).

relationship between the air flow and the geometry of the greenhouse, visualization was performed by injection of smoke in two and three dimensions:

1) The 2D flow visualization. This method is not considered the influence of the model ends, the faces 1 and 2 coincide with the walls of the section of the wind tunnel (Figure 2).

2) The 3D flow visualization. As in the coefficients of pressure surfaces for 3D flow model they are defined as shown in Figure 3. To display one video stream commercial Sony SLT A77 V Co., Ltd. was used, and smoke generator and injector high speed.

The load per unit area is obtained with Equation 2:

$$P = q * C_p \qquad 2)$$

Where: p= downforce per unit area (N m^{-2}); and q= the dynamic pressure of free flow (N m^{-2}).

To validate the flow behavior around the geometry simulation was performed using the software Ansys Version 12®, under the same conditions both flow rate and environmental, as for testing in the wind tunnel.

Para validar el comportamiento del flujo alrededor de la geometría se realizó una simulación utilizando el software Ansys Versión 12®, en las mismas condiciones tanto de velocidad de flujo como ambientales, como para la prueba en túnel de viento.

Resultados y discusión

Comparación de los coeficientes de la fuerza del viento

La geometría para los incisos a), b), c) y d) de la Figura 3, son tipo arco, presentan semejanza; estos estudios se realizaron para diferentes latitudes, aun así, existe variación en sus resultados, estas son atribuidas a lo disimilar de las condiciones experimentales tales como: la prueba en el túnel de viento, la capa límite, el número de Reynolds, la rugosidad del modelo, la localización de las tomas de presión y los métodos de medición (Lee y Lee, 1996). Hay que destacar el coeficiente negativo del inciso e) Figura 3, que no se presenta en los estudios citados anteriormente, éste coeficiente resulta de los vórtices que se generan en la zona de sotavento lo cual se corrobora con la simulación numérica.

La Figura 4 muestra la distribución de los coeficientes de la fuerza del viento, comparada con estudios realizados por diferentes autores. Los valores de los coeficientes en la pared a barlovento presentaron discrepancias. Lee y Lee (1996) Lee (2005) y Nelson (1998) presentaron resultados de 0.5 a 0.6, y de 0.5 a 0.8, respectivamente. Los resultados obtenidos al igual que los reportados por Nelson (1988), ASAE (1976) y JGHA (1981), presentaron valores promedio de 0.7 a 0.8, a diferencia de los resultados reportados por Lee (1996), cuyo valor promedio fue de 0.55.

Debido a que la distribución de la presión del viento sobre las paredes en barlovento varían con el grosor de la capa límite y la altura de la pared, se consideraron coincidentes los valores propuestos por Nelson (1998) y Lee (1996). En este rango de valores encontramos el valor promedio de la pared en barlovento para el invernadero típico con ventila cenital construido en México.

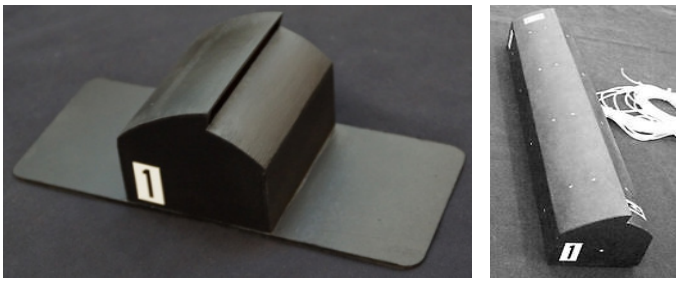
Los coeficientes obtenidos en arco inferior en barlovento en un cuarto del ancho del techo, fueron similares a los reportados por Lee (1996), JGHA (1981) y ANSI (1982), y fueron muy diferentes a los presentados por ASAE (1976). En la región media se encontraron discrepancias

Results and discussion

Comparison of the coefficients of the wind

The geometry for items a), b), c) and d) of Figure 3 are arch type, present likeness; These studies were conducted for different latitudes, even so, there is variation in the results, these are attributed to the dissimilar experimental conditions such as: testing in the wind tunnel, the boundary layer, the Reynolds number, roughness model, the location of the pressure taps and measurement methods (Lee and Lee, 1996). We must emphasize the negative coefficient of subsection e) Figure 3, which is not presented in the studies cited above, this coefficient is of the vortices that are generated in the leeward area which is corroborated by numerical simulation.

In the Figure 4 shows the distribution of the coefficients of the wind compared to studies by different authors. The values of the coefficients on the wall to windward showed discrepancies. Lee and Lee (1996), Lee (2005) and Nelson (1998) presented results of 0.5 to 0.6, and 0.5 to 0.8 respectively. The results as those reported by Nelson (1988), ASAE (1976) and JGHA (1981), showed average values of 0.7 to 0.8, unlike the results reported by Lee (1996), whose average value was 0.55 .



(a) Flujo en 2D (b) Flujo en 3D

Figura 4. Modelos de invernadero fabricados a escala.
Figure 4. Model manufactured greenhouse scale.

Because the distribution of the wind pressure on the walls vary in thickness windward boundary layer and the height of the wall, considered coincident proposed by Nelson (1998) and Lee (1996) values. In this range of values are the average value of the windward wall for the typical greenhouse with overhead vents built in Mexico.

The coefficients obtained in lower arch windward in a quarter of the width of the roof, were similar to those reported by Lee (1996), JGHA (1981) and ANSI (1982), and they

considerables, las cuales son atribuidas principalmente a las diferencias de las condiciones experimentales para la prueba del túnel de viento, tales como el número de Reynolds, el tipo de terreno, superficie del modelo de invernadero, localización de la toma de presión, y métodos de medición. Para arco superior en sotavento en un cuarto del ancho del techo, los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por JHGA (1981), y mostraron inconsistencia con los presentados por Lee (1996), ANSI (1982) y ASAE (1976). Los coeficientes obtenidos en la pared de sotavento fueron similares a los resultados reportados por los autores mencionados.

Para los estudios de referencia solo se realizó la estimación con la dirección del viento a 0° por lo cual no existen resultados comparativos con las siguientes posiciones angulares descritas anteriormente. Según Ha *et al*., (2014), en una prueba de túnel de viento para un invernadero con tres pórticos con una orientación del viento a 0 y 90°, el valor máximo alcanzado de C_p fue de 0.48, con succiones muy altas de hasta -1.39 en la orientación de 0°.

Se consideraron importantes las siguientes observaciones:

Los coeficientes de presión obtenidos se pueden utilizar bajo cualquier valor de velocidad, la geometría del modelo no muestra dependencia con respecto al número de Reynolds. En el período de tiempo de las mediciones, se encontró que los resultados presentan estabilidad sobre los coeficientes de presión. Es notable el caso de flujo incidiendo a los 180°, se presenta un caso peculiar en donde en la superficie A en sotavento, presenta valores positivos de C_p, menores a los de la superficie B en barlovento, debido a la diferencia de alturas de las superficies C y D, y por la forma en arco (Figura 3g).

Se analizaron tres casos críticos: La carga positiva máxima se presentó a 0° en la superficie A, debido a la posición directa en barlovento de la ventila cenital, lo cual generó una tendencia al estancamiento, produciendo altos valores de C_p (Figura 3e). La carga negativa máxima se presentó también en 0° en la superficie lateral 2 y en la superficie B en sotavento (Figura 3e). Finalmente la carga negativa máxima se presentó también en los 180° de incidencia del viento, específicamente en la parte superior de la superficie D, ocasionado por el fuerte desprendimiento del flujo que existe en esa zona (Figura 3g). El valor positivo de C_p sobre el techo en barlovento y la alta succión sobre el techo en sotavento, causaron un gran arrastre sobre los marcos el cual puede ocasionar pandeo o colapso del marco a una velocidad

were very different from those presented by ASAE (1976). In the middle region of significant discrepancies they were found, which are mainly attributed to differences in the experimental conditions for testing wind tunnel, such as the Reynolds number, the type of terrain, surface model greenhouse, location taking pressure, and measurement methods. To top leeward bow in a quarter of the width of the roof, the results were similar to those reported by JHGA (1981), and showed inconsistency with those presented by Lee (1996), ANSI (1982) and ASAE (1976). The coefficients obtained on the leeward wall were similar to the results reported by these authors.

For baseline studies only estimate the wind direction was held at 0° for which there are no comparative results with the following angular positions described above. According to Ha *et al*., (2014), in a test wind tunnel for a greenhouse with three porches with wind direction at 0 and 90°, the maximum value reached C_p was 0.48, with very high suctions up -1.39 in the orientation 0°.

The following observations were considered important:

The pressure coefficients obtained can be used under any speed value, the model geometry shows no dependence on the Reynolds number. In the time period of measurements, the results were found to exhibit stability over pressure coefficients. It is remarkable the case of flow affecting 180°, a peculiar case is presented where the surface A leeward, presents positive values of C_p, lower than those of the B surface windward due to the difference in heights C and D surfaces, and the arc shape (Figure 3g).

Three critical cases were analyzed: Positive maximum load was presented at 0° on the surface A, due to the direct position on the windward side of the overhead vent, which generated a tendency to stagnation, producing high values of C_p (Figure 3e). The negative maximum load was also presented at 0° on the side surface 2 and B leeward surface (Figure 3e). Finally the negative maximum load was also presented at the 180° of incidence of the wind, specifically on top of the surface D, caused by the vigorous evolution of flow exists in that area (Figure 3g). The positive value of C_p on the roof windward and high suction on the roof leeward, caused a large drag on the frames which can cause buckling or collapse under a low wind speed, as in an isolated frame (Figure 3e). Therefore, the arc near the wall should be reinforced, or leeward column design.

de viento baja, como sucede en un marco aislado (Figura 3e). Por lo cual, el arco cerca de la pared debe ser reforzado, o diseñar la columna en sotavento.

La carga por unidad de superficie se presenta en las Figuras 5-8, para cada zona de incidencia del viento, la importancia de los resultados de estas gráficas radica en que pueden ser utilizados de manera directa por los diseñadores de las geometrías de invernaderos en la región central de México, se observa que la máxima carga se presenta sobre la superficie A (Figura 5), se infiere que a una determinada velocidad del viento le corresponde un valor de carga de presión de diseño, así mismo para cada una de las figuras a diferentes incidencias del flujo de viento.

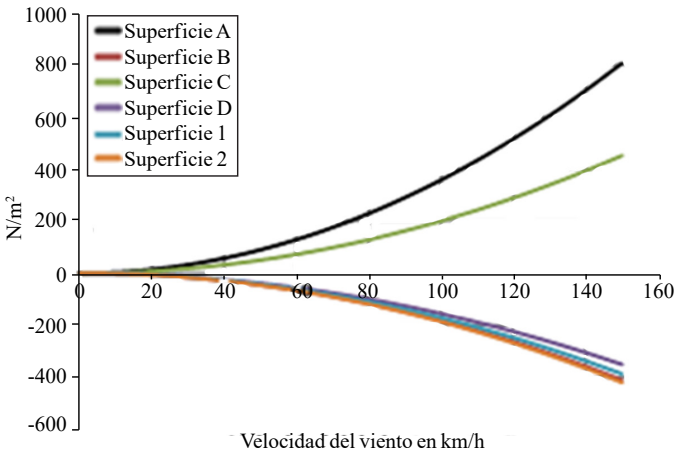


Figura 5. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 0° (al nivel del mar).

Figure 5. Downforce per unit area at 0° (at sea level).

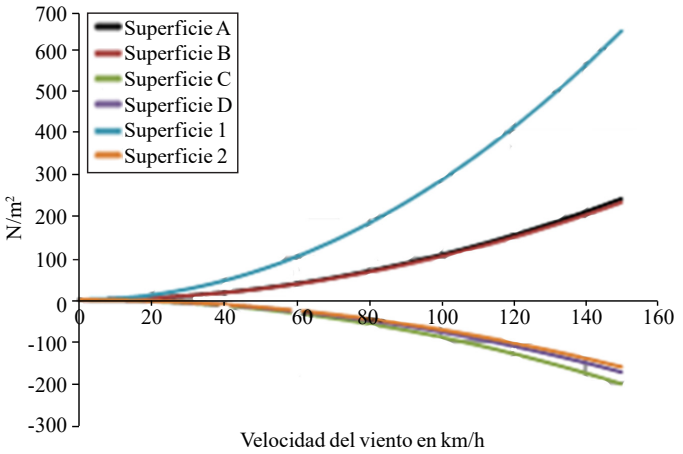


Figura 6. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 90° (al nivel del mar).

Figure 6. Downforce per unit area at 90° (at sea level).

The load per unit area is shown in Figures 5-8, for each zone of incidence of the wind, the importance of the results of these graphs is that they can be used directly by designers geometries in greenhouses central Mexico, it is observed that the maximum load occurs on the surface a (Figure 5), it follows that at a given wind speed corresponds to a value of pressure head design, likewise for each of the figures different incidents of wind flow.

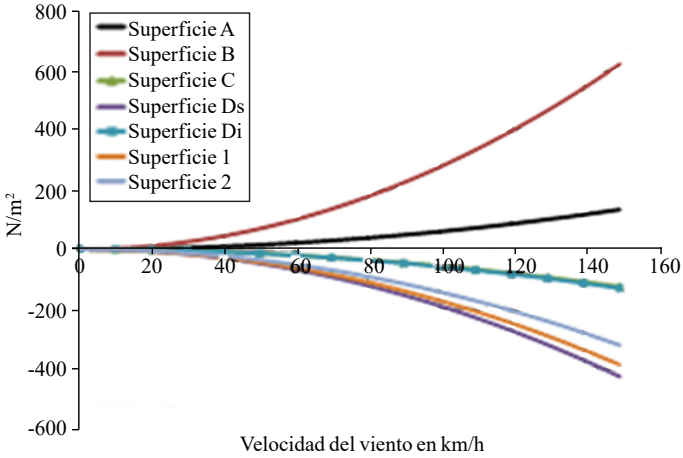


Figura 7. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 180° (al nivel del mar).

Figure 7. Downforce per unit area to 180° (at sea level).

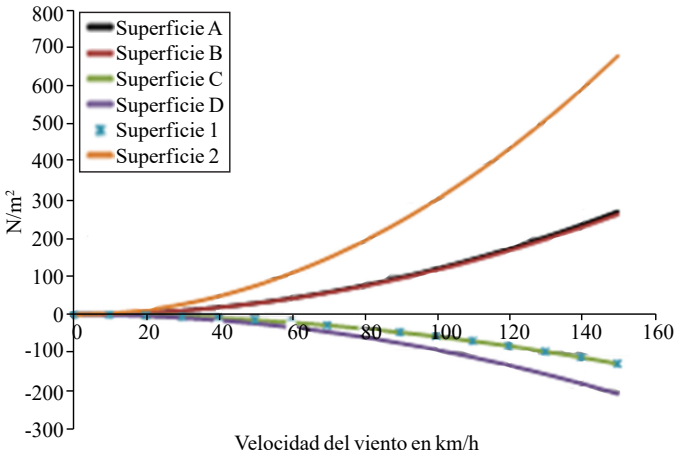


Figura 8. Carga aerodinámica por unidad de superficie a 270° (al nivel del mar).

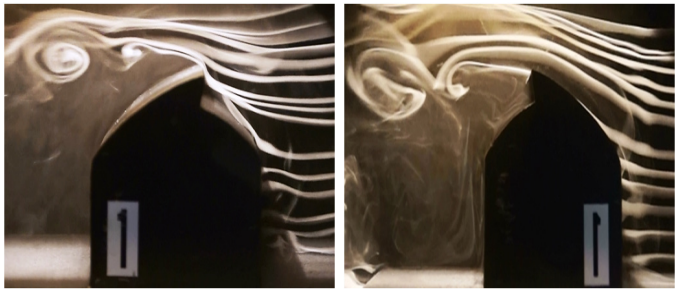
Figure 8. Downforce per unit area to 270° (at sea level).

Airflow display 2D smoke obtained by injection

In Figure 9a vortices detached from the top of the model, generated in an area of depression leeward observed. In Figura 9b vortices generated by the shedding flow on top

Visualización del flujo de aire en 2D obtenido por inyección de humo

En la Figura 9a se observan los vórtices desprendidos de la parte superior del modelo, generando en sotavento una zona de depresión. En la Figura9b se muestran los vórtices generados por el desprendimiento del flujo en la parte superior de la ventila. Nótese que el número 1 en posición de reflexión se debe a que el modelo giró 180° en el túnel y el equipo fotográfico captó en forma invertida al modelo. Finalmente se le dio un tratamiento digital a la imagen para que coincidiera el sentido del flujo al del primer caso analizado (sentido de derecha a izquierda).



(a) Ventila cenital en barlovento (b) Ventila cenital en sotavento

Figura 9. Vórtices generados en la parte superior del modelo por el desprendimiento del flujo. Visualización del flujo de aire en 3D obtenido por inyección de humo.

Figure 9. Vortices generated at the top by the evolution model of the flow. Airflow display 3D obtained by injection smoke.

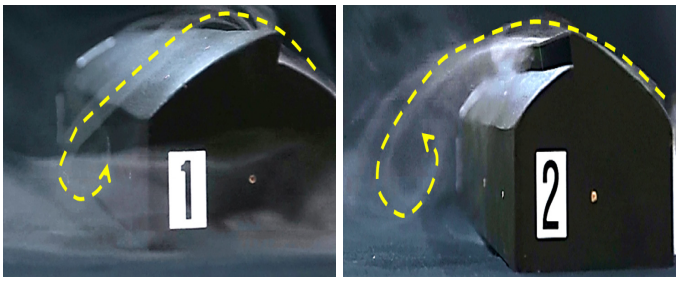
La Figura 10a presenta el flujo tridimensional de aire a 0°, y se observa una adherencia mayor de las líneas de corriente en comparación con el caso del flujo bidimensional. La Figura 10b presenta el flujo tridimensional de aire a 180°, y se observa un vórtice de mayores dimensiones al caso de la dirección 0°. La Figura 11 presenta en ambos casos un desprendimiento de flujo en las esquinas, generando vórtices adyacentes a estas, teniendo muy baja influencia la condición asimétrica del toldo.

Simulación del flujo de aire en 2D obtenido por elemento finito

El comportamiento de flujo con orientación a 0°, denota la generación de una serie de vórtices debido a la geometría que presenta la ventila cenital, dando lugar a una zona de presión negativa que actúa sobre sotavento en forma de arrastre (Figura 12). Se puede apreciar la generación de vórtices justo en la zona de depresión, causando una estela de turbulencia bastante larga en comparación con el ancho

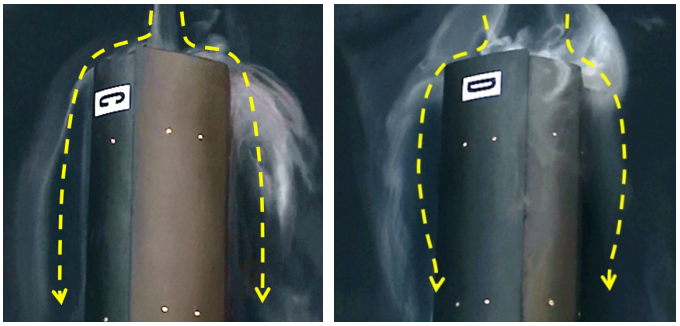
of the vent shown. Note that the number 1 in reflection position is that the model turned 180° in the tunnel and photographic equipment captured in the model inverted. Finally he was given a digital treatment of the image to match the flow direction to the first case analyzed (direction from right to left).

In the Figure 10a presents the three-dimensional air flow at 0°, and greater adherence of the lines of current compared to the case of two-dimensional flow is observed. Figure 10b shows the three-dimensional air flow 180°, and a vortex larger is observed to the case of direction 0°. Figure 11 presents in both cases a detached flow at the corners, generating vortices adjacent to these, having very low influence asymmetric condition of the awning.



(a) Ventila cenital en barlovento (dirección a 0°) (b) Ventila cenital en sotavento (dirección a 180°)

Figura 10. Dirección de las corrientes de aire en el modelo.
Figure 10. Address of air currents in the model.



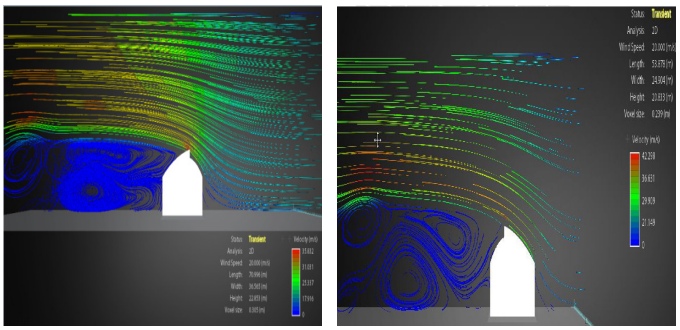
(a) Aplicación del aire en la superficie 1 (b) Aplicación del aire en la superficie 2

Figura. 11. Vórtices adyacentes a las esquinas.
Figure. 11. Vortices adjacent to the corners.

Air flow simulation obtained 2D finite element

The flow behavior oriented at 0°, denotes the generation of a series of vortices due to the geometry having the overhead vent, resulting in a negative pressure acting on the leeward shaped drag (Figure 12). Can be seen just vortices generation area depression, causing turbulence wake quite long compared to the width of the cross section. A 180° vortices are also appreciated, the difference is its development, its

de la sección transversal. A 180° también se aprecian los vórtices, la diferencia es su desarrollo, su diámetro va en aumento rápidamente y son dirigidos hacia el terreno con una pendiente muy pronunciada, el último vórtice se abre y esto ocasiona una región de flujo inverso impactando a un costado del modelo, lo cual concuerda con los valores positivos de C_p (Figuras 3a y 12).



(a) Ventila cenital en barlovento (orientación a 0°) (b) Ventila cenital en sotavento (orientación a 180°)

Figura 12. Simulación por elemento finito de las corrientes y vórtices de aire en el modelo de invernadero.

Figure 12. Finite element simulation of currents and vortices the air in the greenhouse model.

Simulación del flujo de aire en 3D obtenido por elemento finito

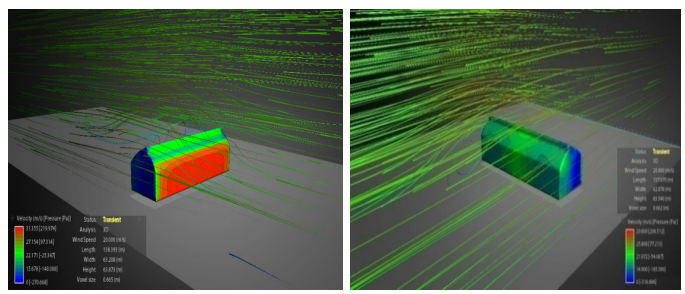
La distribución de flujo libre, así como la presión ejercida sobre el modelo con una orientación de 0°, se distribuyó en el área de barlovento, encontrándose el valor más crítico en el centro, mostrando una tendencia decreciente hacia las orillas. En sotavento se aprecia una zona de presión negativa, debido a los vórtices que se desprenden de la geometría superior del mismo (Figura 13a). También aquí se aprecian los vórtices, sin embargo su trayectoria es más pronunciada hacia el suelo, generando con esto una zona en sotavento con un valor de coeficiente de presión positivo.

Cuando cambia la orientación del flujo de viento en dirección a 180°, se observa un aumento en el valor de la presión negativa que incide en sotavento, debido a que el vórtice generado es de mayor tamaño en comparación con el obtenido en la orientación de 0° (Figura 13b). Para las zonas definidas cómo 1 y 2 predomina el desprendimiento de flujo justo en la esquina, con una tendencia a adherirse corriente abajo, tendiendo cualitativamente a existir una similitud entre el experimento en túnel de viento y la simulación en CFD (Figuras 14a y 14b). Al igual que Ha *et al*. (2014), los valores obtenidas de la distribución de C_p de la simulación con CFD y de la visualización con flujo de

diameter is increasing rapidly and are directed towards the ground with a steep slope, the last vortex opens and this causes a region of reverse flow impact to the side model, which is consistent with the positive values of C_p (Figures 3a and 12).

Air flow simulation obtained 3D finite element

The distribution of free flow and the pressure exerted on the model with an orientation of 0°, was distributed in the windward area, being the most critical value in the center, showing a downward trend towards the banks. Leeward negative pressure zone due to vortices emerging from the top of the same geometry (Figure 13a) can be seen. Also here the vortices are seen, but its trajectory is steeper toward the ground, generating this an area downwind with a value of positive pressure coefficient.



(a) Vista 3D con las superficies 1, A y C al frente (b) Vista 3D con las superficies 2, A y C al frente

Figura 13. Simulación por elemento finito de las corrientes de aire en barlovento respecto a las ventilas cenitales (orientación del flujo a 0°).

Figure 13. Finite element simulation of the air currents in regard to windward aerial vents (flow orientation at 0°).

When the orientation of the wind flow direction 180°, an increase in the value of the negative pressure affects leeward, because the vortex generated is larger compared with that obtained in the direction of 0° it is observed (Figure 13b). For areas defined as 1 and 2 predominates detachment flow just around the corner, with a tendency to adhere downstream, tending qualitatively to be a similarity between the experiment in wind tunnel and simulation in CFD (Figures 14a and 14b). As Ha *et al*. (2014), the values obtained from the distribution of C_p simulation CFD and visualization airflow, were qualitatively similar but for comparison is necessary to improve the CFD model. The study display both smoke injection as computed by numerical simulation, coincided with the data distribution coefficients reported pressure.

aire, fueron cualitativamente similares, aunque para fines de comparación es necesario mejorar el modelo CFD. El estudio de visualización tanto con inyección de humo como por medio de la simulación numérica computarizada, coincidió con los datos de distribución de coeficientes de presión reportados.

Conclusiones

En este estudio, se determinó la distribución de los coeficientes de presión del aire a lo largo de las superficies del modelo de invernadero, estos fueron calculados por una prueba en un túnel de viento el cual simula el flujo; en general los valores calculados están dentro un rango aceptable. Se comparó la distribución de flujo con la simulación numérica y los valores promedio de los coeficientes con otros estudios; un caso crítico de carga positiva máxima se presentó a 0° de incidencia del viento en la superficie A debido a la posición directa en barlovento de la ventila cenital.

Y se determinó la carga aerodinámica por unidad de superficie la cual será de utilidad para que los constructores evalúen y sugieran un nuevo plan de diseño teniendo en cuenta la estabilidad estructural.

Literatura citada

Allori, D.; Bartoli, G. and Miguel, A. F. 2011. Fluid flow through macro-porous materials: friction coefficient and wind tunnel similitude criteria. Int. J. Fluid Mech. Res. 39(2):136-148.

Allori, D.; Bartoli, G. and Mannini, C. 2013. Wind tunnel tests on macro-porous structural elements: a scaling procedure. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 123:291–299.

American National Standards Institute. 1982. Minimum design loads for buildings and other structures. ANSI 58.1. New York, N.Y, United States. 100 p.

American Society of Agricultural Engineers. 1976. Designing building to resist snow and wind loads. ASAE. United States. 373-377 pp.

Barlow, J. B.; Rae, W. H. and Pope, A. 1999. Low-speed wind tunnel testing. 3rd ed. Wiley. New York, USA. 713 p.

Belloli, M.; Rosa, L. and Zasso, A. 2014. Wind loads and vortex shedding analysis on the effects of the porosity on a high slender tower. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 126:75-86

Briassoulis, D.; Waaijenber, J.; Gratraud, J. and Von Eslner, B. 1997. Mechanical properties of covering material for greenhouses: part 1. General overview. J. Agric. Eng. Res. 67(3):81-96.

Briassoulis, D.; Mistriotis, A. and Giannoulis, A. 2010. Wind forces on porous elevated panels. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 98(12):919-928.

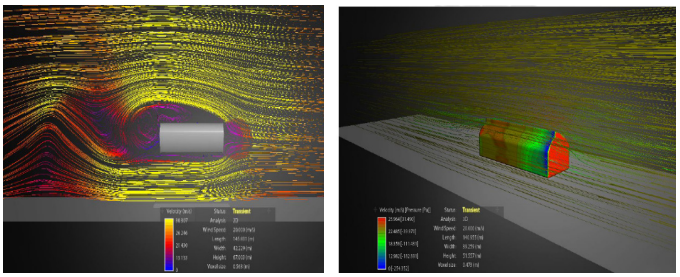


Figura 14. Distribución del viento y de la presión en barlovento de los laterales del modelo obtenidos por software de elemento finito en 3D.

Figure 14. Distribution of wind and pressure windward side software model obtained by finite element 3D.

Conclusions

In this study, the distribution coefficients air pressure along surfaces greenhouse model was determined, these were calculated by a test in a wind tunnel which simulates the flow; generally calculated values are within an acceptable range. The flow distribution to the numerical simulation and the average values of the coefficients compared with other studies; a critical peak load positive case was brought to 0° incidence surface wind A due to direct windward position in the overhead vent.

And the downforce was determined per unit area which will be useful for builders evaluate and suggest a new design plan taking into account the structural stability.

End of the English version

Brugger, M. J.; Montero, E.; Baeza, J. and Pérez, P. 2005. Computational fluid dynamic modelling to improve the design of the spanish parral style greenhouse. Acta Horticulturae 691:425-431.

Building center of Japan. 1994. Guidebook of wind tunnel test for building. Tokio, Japan.

ENV 1991-1. 2002. Eurocode 1: basis of design and actions on structures: basis of design. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium. 61-70 pp.

Fluent. 2013. Fluent documentation. Fluent Inc. Lebanon. N. H. USA. 1864 p.

Grafiadellis, M. 1999. The greenhouse structures in Mediterranean regions-problems and trends. Cahiers Options Mediterraneennes. 31:17-27.

Ha, T.; Lee, I. B.; Hwang, H. and Ha, J. 2014. Wind pressure coefficients determination for greenhouse built on a reclaimed land. Acta Hortic, 1037:1001-1008.

Hoxey, R. P. and Richardson G. M. 1984. Measurements of wind load son pull-scale film plastic. Ciad. greenhouse. J. Wind Eng. Ind- Aerodyn. 16(1):57-83.

Japan Greenhouse Horticulture Association, 1981. Greenhouse structural requirement. JGHA. Japón. 12-17 pp.

Jensen, M. and Grank N. 1995. Model-scale tests in turbulent wind: part II. Danish technical press. Copenhagen, Denmark. 97 p.

Kendirli, B. 2005. Structural analysis of greenhouses: a case study in Turkey. Build Environ. 75(1):1-16.

Lee, S. G. and Lee, H. W. 1996. An analysis of wind force coefficients for structural design of greenhouse. Acta Hortic. 440:280-285

Lee, I.; Lee, S.; Kim, G.; Sung, J.; Sung, S. and Yoon, Y. 2005. PIV verification of green- house ventilation air flows to evaluate CFD accuracy. Transactions of the ASAE. 48(5):2277-2288.

Mathews, E. H. and Meyer, J. P. 1987. Numerical modeling of wind loading on a film clad greenhouse. Bldg. Environ. 22(2):129-134.

Mistriotis, A. and Briassoulis, D. 2002. Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with opening. Comp. Electric. Agric. 34(1):191-205.

Moniyama, H.; Sase, S; Uematsu, Y. and Yamaguchi, T. 2010. Wind tunnel study of the interaction of twoor three side by side pipe - framed greenhouses on wind pressure coefficients. Transactions of the ASABE. 53(2):585-592.

Nelson, G. L.; Manbeck, H. B. and Meador, N. F. 1988. Light agricultural and industrial structures. Van Nostrand Reinhold Co. Netherlands. 147-161 pp.

Robertson, A. P.; Roux, J.; Gratraud, G.; Sxarascia, S.; Castellano, M.; De Virel, D. and Palier, P. 2002. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90(4-5):461-474.

Subramani, T. and Sugathan, A. 2012. Finite element analysis of thin walled-shell structures by ANSYS and LS-DYNA. Int. J. Moder. Eng. Res. (IJMER). 2(4):1576-1587.

Von Elsner, B.; Briassoulis, D.; Waaijenberg, D.; Mistriotis, A.; Von Zabelititz, C.; Gratraud, J.; Russo G. and Suay-Cortes, R. 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part I: desing requirements. J Agric. Eng. Res. 75(1):1-16.