

## Estudio numérico del efecto de generadores de vórtices en la aerodinámica de un vehículo tipo sedán

Enrique Ochoa Rodríguez<sup>1</sup>, Dr. Oscar Tenango Pirin<sup>2</sup>, Dra. Elva Lilia Reynoso Jardón<sup>3</sup> y Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón<sup>4</sup>

**Resumen**— Una fuerza que se opone al movimiento de un vehículo terrestre es provocada por la resistencia aerodinámica que depende de factores como su geometría y velocidad. Una alternativa para reducirla, es mejorar la aerodinámica del vehículo utilizando generadores de vórtices (VGs por sus siglas en inglés). Estos dispositivos reducen el arrastre de un vehículo retardando el desprendimiento de la capa límite, traduciéndose en menor consumo de combustible y mayor maniobrabilidad. Se realizó un estudio numérico al efecto del uso de generadores de vórtices en un vehículo tipo sedán. Los cálculos incluyeron: análisis del vehículo sin VGs, y el estudio de dos geometrías de VGs con dos arreglos diferentes para cada uno, éstas incluyen generadores tipo *bumped-shape* y *delta-wing*. Para determinar las geometrías y arreglos óptimos, se analizaron los resultados del coeficiente de arrastre, distribución de presión y campos de velocidad del aire. Esto permitirá reducir el arrastre aerodinámico del vehículo y mejorar su desempeño en altas velocidades.

**Palabras clave**— CFD, Arrastre aerodinámico, Generadores de vórtices, Coeficiente de arrastre.

### Introducción

En la actualidad, disminuir el daño al medio ambiente es uno de los principales objetivos de la industria automotriz, lo cual se busca obtener a través de la reducción en el consumo del combustible por medio de un desempeño más óptimo del vehículo, lo cual implica mejor aceleración, mayor torque, entre otras cosas (Islam et al. 2013). Una de las alternativas que propuso Islam et al. (2013), para reducir el consumo de combustible, es reducir el arrastre aerodinámico; afirman que el arrastre aerodinámico en el automóvil se genera por el movimiento de partículas de aire sobre este. El arrastre aerodinámico tiene dos componentes, según Cieśliński et al., (2016): 1. Fricción con la superficie, la cual ocurre por la fricción entre el fluido y la superficie por la que éste fluya. Esta fricción está asociada con el desarrollo de la capa límite, y aumenta o disminuye de manera exponencial con el número de Reynolds. 2. Arrastre de forma, la cual proviene de los movimientos de vórtices que se forman en el fluido por el paso del cuerpo y generalmente es menos sensible al número de Reynolds que el arrastre por fricción.

La resistencia aerodinámica juega un papel crucial en el desempeño de un vehículo ya que esta se vuelve más significativa a medida que aumenta la velocidad del vehículo Shivam et al., (2015).

La resistencia aerodinámica de un vehículo comercial, puede consumir gran parte del combustible del vehículo, alcanzando hasta un 60% (Govindharanjan et al., 2013). Por ejemplo, de acuerdo con Chainani y Perera (2008), hasta el 40% del arrastre aerodinámico de un auto tipo *hatchback*, se desarrolla en la parte trasera. Este tipo de vehículo es tradicionalmente visto como un automóvil de tamaño coupé a sedán con una puerta en la parte posterior en vez de maletero. Sin embargo, Ali et al. (2013), aseguraron que con la presencia de un maletero en la parte posterior de un auto tipo sedán, se tendría un menor arrastre aerodinámico en comparación a un auto tipo *hatchback*, lo cual provocaría que el flujo del aire se separe al final del techo para que luego se vuelva a juntar en el mismo. Según Govindharanjan et al. (2013), un recurso para retardar la separación del flujo es utilizar hoyuelos parecidos a los de una pelota de golf, dado a que provocan una transición del flujo laminar a turbulento en la capa límite. Señalan que la manufactura de estos hoyuelos es complicada por lo que existen diferentes maneras de optimizar el arrastre aerodinámico; también mencionan que la manera más práctica de reducir la resistencia en la parte posterior del automóvil, es usar una técnica efectiva para el control del flujo. Naveen et al. (2015), sugirieron algunos recursos para optimizar las fuerzas aerodinámicas del vehículo, los cuales podrían ser un difusor trasero, aletas, faldas aerodinámicas, cubiertas de ruedas, alerón, sistema de reducción de arrastre aerodinámico o generadores de vórtices (VGs, por sus siglas en inglés), entre otros.

Los generadores de vórtices son dispositivos aerodinámicos que consisten en pequeñas paletas comúnmente unidas a la superficie del vehículo para reducir la resistencia aerodinámica (Shivam et al., 2015). La función

<sup>1</sup> Enrique Ochoa Rodríguez es estudiante de Ingeniería en Sistemas Automotrices en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. [al150291@alumnos.uacj.mx](mailto:al150291@alumnos.uacj.mx)

<sup>2</sup> Dr. Oscar Tenango Pirin es Profesor de Ingeniería en Sistemas Automotrices en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. [oscar.tenango@uacj.mx](mailto:oscar.tenango@uacj.mx)

<sup>3</sup> Dra. Elva Lilia Reynoso Jardón es Profesora de Ingeniería en Manufactura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. [elva.reynoso@uacj.mx](mailto:elva.reynoso@uacj.mx)

<sup>4</sup> Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón es Profesor de Ingeniería Industrial y de Sistemas en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. [luis.picon@uacj.mx](mailto:luis.picon@uacj.mx)

principal de los VGs, es retardar la separación de la capa límite lo cual reduce la fricción del vehículo con el aire y, por lo tanto, su resistencia. (Baldacchino et al., 2018), destacaron que los VGs solo funcionarían si se montan frente a la línea de separación media. En esta posición, deben ser lo suficientemente grandes como para generar suficiente vorticidad fluvial y así evitar la separación del flujo. Ali et al. (2013) señalaron que debido a la forma aerodinámica tan compleja que debe tener un vehículo de pasajeros, el coeficiente de arrastre ( $C_d$ , por sus siglas en inglés), tiene valores de entre 0.2 y 0.5. Estos valores del  $C_d$ , son respuestas a las necesidades de los posibles compradores, los cuales demandan espacio para equipaje, mayor número de pasajeros e incluso espacio para el motor, haciendo extremadamente difícil una forma aerodinámica ideal para el vehículo. Entonces, los generadores de vórtices son una opción viable que permiten reducir el arrastre del vehículo sin provocar grandes cambios en la forma de un vehículo y obstaculizar las demandas antes mencionadas.

En este trabajo se aplicó la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), para estudiar el efecto del implemento de generadores de vórtices en la aerodinámica de un vehículo tipo sedán. Se estudiaron varias geometrías y arreglos de VGs. Los resultados permitieron determinar el tipo de generador y el tipo de arreglo más óptimo para el vehículo. De acuerdo con la literatura (Yadav et al., (2018), Naveen et al. (2015), Ali et al. (2013)), el lugar óptimo de los VGs es 100 mm antes de terminar el techo del vehículo.

### Descripción del Método

En este trabajo, se realizó el análisis numérico de la aerodinámica de un vehículo BMW 740d del 2015. Para obtener el modelo numérico para ser usado en CFD, primero se construyó un modelo CAD (diseño asistido por ordenador, por sus siglas en inglés) tridimensional del vehículo en cuestión. La geometría completa fue tomada de dwgmodels (2019). Debido a la complejidad geométrica del vehículo, se optó por simplificar la geometría omitiendo algunas partes y detalles externos considerados irrelevantes para el estudio, obteniendo la geometría base simplificada que se muestra en la Figura 1. Los generadores de vórtices fueron agregados a la geometría base dando origen a los distintos casos de estudio.

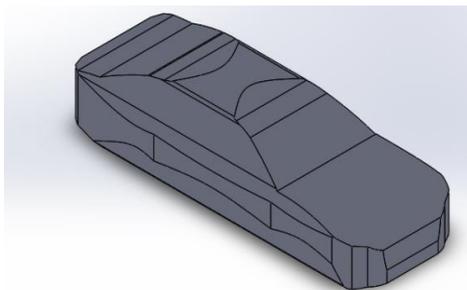


Figura 1. Modelo de la geometría, BMW 740d 2015.

Se estudiaron cinco casos diferentes: el auto sin VGs (caso base), y dos tipos de VGs (Bumped – Shape y Delta Wing) con dos tipos de arreglos (en serie y zigzag) para cada uno. Los generadores tipo Bumped – Shape o forma abultada, mostrados en la Figura 2a, son piezas con una pendiente en la parte trasera en un ángulo entre 25 a 30 grados, y deben estar ubicados inmediatamente antes de la separación del flujo Jagadeesh et al., (2013). Además, otra ventaja es que poseen una curva en la parte frontal que les permite minimizar el arrastre. El otro tipo de generador es el llamado Delta Wing o Ala Delta, el cual se muestra en la Figura 2b. Algunos estudios de Islam et al., (2013), demostraron que la geometría de estos VGs puede llegar a ser más efectiva que la del tipo Bumped – Shape, ya que tienen una menor área frontal, reduciendo así el área de contacto que se opone a las corrientes de aire.

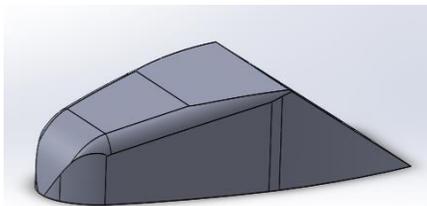


Figura 2a. Modelo de VG, Bumped – Shape.

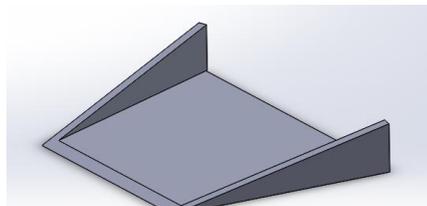


Figura 2b. Modelo de VG, Delta Wing.

Para el análisis de los distintos casos, se realizaron cálculos usando la técnica de volumen finito mediante el uso de la Dinámica de Fluidos Computacional en el programa comercial ANSYS Fluent (ANSYS, 2009).

Se usaron las ecuaciones de Navier - Stokes promediadas de Reynolds (RANS por sus siglas en inglés), en estado estacionario para resolver las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos. Las ecuaciones gobernantes incluyen la ecuación de continuidad y la de conservación de momento, las cuales en su forma promediada para un fluido newtoniano incompresible, se describen en las ecuaciones 1 y 2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $p$  es la presión estática,  $\bar{\tau}$  representa el tensor de esfuerzos viscoso, y  $\rho \vec{g}$  y  $\vec{F}$  son las fuerzas de cuerpo y fuerzas externas, respectivamente (ANSYS, 2009). El fluido fue tratado como continuo, incompresible y turbulento, por lo tanto, se empleó un modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$  para resolver el problema de cierre de la ecuación de conservación de momento.

El modelo  $k - \varepsilon$ , es un modelo de dos ecuaciones que fue seleccionado con base en estudios previos de aerodinámica de vehículos (Rahman C. y Thiagarajan, (2015); Cheng y Mansor, (2017); Cihan, (2019)). Se usó su versión *standard* en conjunto con la función de tratamiento en la pared mejorado, la cual impone la función de muro para modelar el perfil de la capa límite para la estimación de la fricción superficial en las superficies de la pared (Cheng y Mansor, 2017).

En ambas geometrías, el automóvil y los VGs, fueron incluidas dentro de un túnel, el cual se muestra en la Figura 3, para simular el aire circundante cuando el vehículo está en movimiento. De esta forma, los volúmenes computacionales corresponden únicamente al volumen ocupado por el aire. En el túnel de viento el fluido fluyó en sentido positivo sobre el eje “x” de acuerdo al sistema de coordenadas y las medidas del túnel fueron basadas de acuerdo a Ranjan et al., (2019), en donde 400 mm se encuentran frente al vehículo y 900 detrás de este, 2 veces la altura de vehículo de altura.

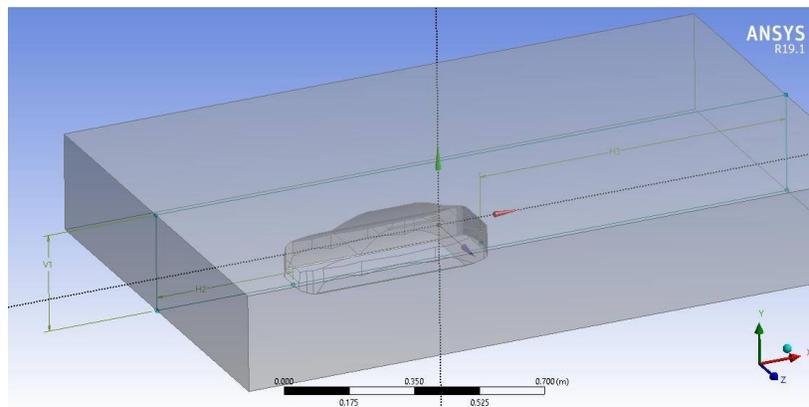


Figura 3. Túnel de viento.

Después, se realizó un análisis de convergencia de malla tomando el caso del auto sin VGs y una velocidad constante. Se realizaron 5 mallas de distintas densidades usando elementos tetraédricos, cuyas características se muestran en la Tabla 1. Para seleccionar la malla, se tomó como referencia el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) obtenido por cada malla. De acuerdo al análisis, la malla seleccionada para los cálculos fue la Malla 2, porque presentó un porcentaje de error menor al 1 % respecto a los demás casos, como indica la Tabla 1.

Tabla 1. Convergencia de malla

Malla	Total de Elementos	$U$ (m/s)	Cd	Error %
Malla 1	3,367,658	27.77	0.299422159	
Malla 2	4,946,173	27.77	0.295967818	1.15367%
Malla 3	8,322,576	27.77	0.297053545	0.36684%
Malla 4	11,513,844	27.77	0.305585428	2.87217%
Malla 5	16,922,520	27.77	0.311779724	2.02703%

Para las condiciones de frontera, se utilizó aire en condiciones atmosféricas. En la entrada del túnel se usó una condición de velocidad de  $27.77 \text{ m/s}$  basado en el estudio de Chowdhury et al., (2013). Y en la salida se asignó presión atmosférica y las paredes del túnel fueron definidas como de tipo pared sin deslizamiento. Mientras tanto, el resto de las paredes del túnel (paredes laterales, superior e inferior) y las superficies que envuelven al vehículo fueron definidas del tipo pared sin deslizamiento.

## Resultados

Tabla 2. Comparación de coeficientes de arrastre

Caso		Total Cd
BMW 740d 2015	Base	0.306332084
Delta Wing Serie	1	0.306256825
Bumped Shape Serie	2	0.313170926
Delta Wing Zigzag	3	0.298903815
Bumped Shape Zigzag	4	0.311236585

En esta sección se analizó el impacto que tuvieron los VGs y sus distintos arreglos mediante el cálculo del Cd, el cual se muestra en la Tabla 2. El caso base, en el que la geometría del vehículo BMW 740d 2015 no presenta ningún generador de vórtices, se toma como referencia para analizar los casos 1 al 4. En el Caso 1, representado en la Figura 4a, se le anexan al vehículo los VGs tipo Delta Wing acomodados en serie. Los resultados mostraron una reducción en el coeficiente de arrastre, y una menor dispersión de presión estática sobre la superficie del vehículo. En el Caso 2, mostrado en la Figura 4b, se utilizaron los VGs tipo Bumped - Shape acomodados en serie., En este caso se presentó un mayor Cd, debido a que este VG muestra una mayor área frontal en comparación al VG tipo Delta. También se observó un mayor nivel de presión estática en la superficie del vehículo, ya que ocasiona una separación mayor de la capa límite.

Para los Casos 3 y 4, ambos tipos de VGs están acomodados en zigzag, como se presentan en las Figuras 4c y 4d, respectivamente. El Caso 3, representado en la Figura 5 es el caso que presentó una mayor eficacia sobre el control de la capa límite. Las líneas de corriente obtenidas de este caso se muestran en la Figura 6, donde se observa que la corriente del flujo de aire se adhiere a la superficie del vehículo, logrando con esto el menor coeficiente de arrastre. Por último, el Caso 4 presentó una reducción de Cd frente al Caso 2, sin embargo, este caso sigue teniendo mayor coeficiente de arrastre que el caso base, por lo que no representa una mejora aerodinámica significativa para el BMW 740d.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados, el arreglo de zigzag presentó una mayor adherencia de la capa límite en la superficie del vehículo respecto al arreglo en serie. Con el arreglo zigzag se obtuvo una reducción de Cd, ya que permite que el punto de separación de la capa límite se retrase, ocasionando que la región de baja presión se reduzca antes de volver a llegar al maletero.

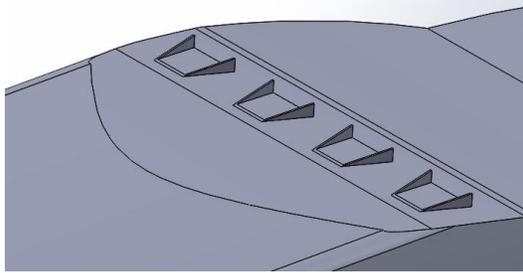


Figura 4a. Caso 1, Delta Wing – Serie

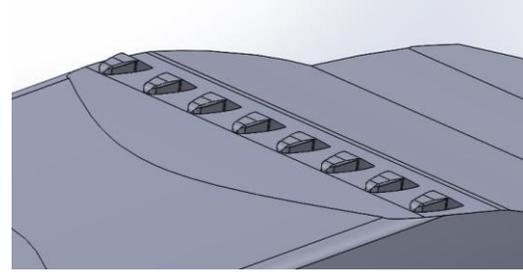


Figura 4b. Caso 2, Bumped Shape - Serie

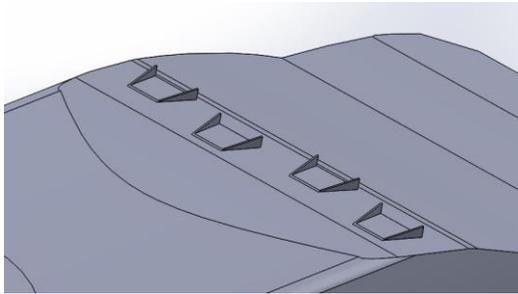


Figura 4c. Caso 3, Delta Wing - Zigzag

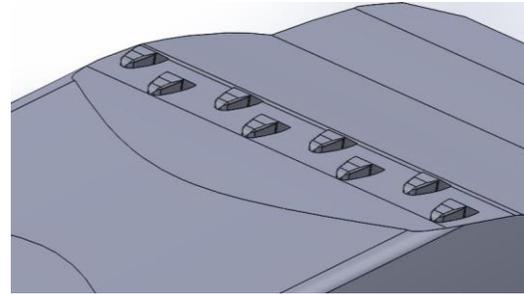


Figura 4d. Caso 4, Bumped Shape - Zigzag

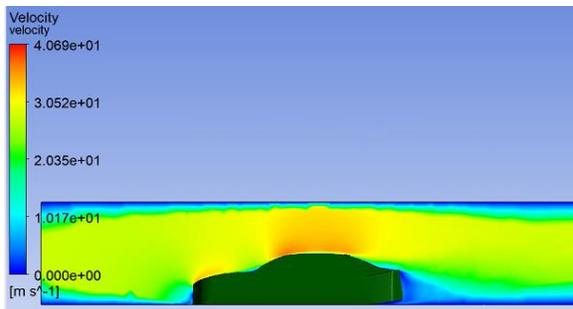


Figura 5. Caso 3, Velocidad de Flujo de aire

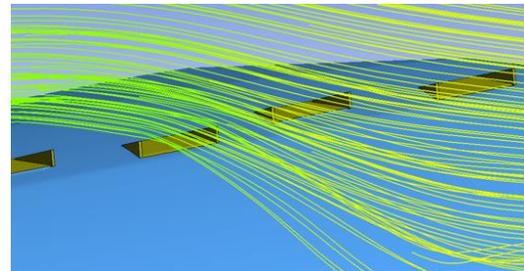


Figura 6. Caso 3, Líneas de flujo

### Comentarios Finales

#### Resumen de resultados

Se hizo un análisis de volumen finito mediante CFD para determinar el tipo y arreglo de generador más viable. Los resultados de los coeficientes de arrastre para cada caso de estudio se presentaron en la Tabla 2. Los VGs tipo ala delta, presentaron la mayor reducción de la capa límite por lo que presentan un menor  $C_d$ . En cuanto a los arreglos, el arreglo en zigzag fue el que presentó el menor coeficiente de arrastre.

#### Conclusiones

En este estudio, por medio de la dinámica de fluidos computacional, se observó que la adherencia de la capa límite sobre la superficie de un vehículo, mejora el  $C_d$ , una deficiencia que se presenta en la mayoría de los vehículos comerciales por su geometría complicada. De los casos estudiados, los VGs tipo Delta Wing con un arreglo tipo Zigzag, probaron ser los eficaces al mejorar la aerodinámica del vehículo en mayor medida. Además, se demuestra que los generadores de vórtices son dispositivos que ayudan en gran proporción a reducir el arrastre aerodinámico.

#### Referencias bibliográficas.

- Ali, M. H., Mashud, M., Al Bari, A., & Misbah-Ul Islam, M. (2013). Aerodynamic Drag Reduction of a Car by Vortex Generation. *International Journal of Mechanical Engineering*, 12-21.
- ANSYS. (23 de Enero de 2009). 4.4.1 Standard k- e Model. Obtenido de ANSYS: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node58.htm>
- ANSYS. (8 de Septiembre de 2009). Step 4: Setting Up the CFD Simulation in ANSYS FLUENT. Obtenido de ANSYS: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/wbtg/node10.htm>
- Baldacchino, D., Ferreira, C., & De Tavernier, D. (2018). Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil. *The Authors Wind Energy*, 745-765.

- Chainani, A., & Perera, N. (2008). CFD Investigation of airflow on a model radio control race car. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 2, 2-6.
- Cheng, S.-Y., & Mansor, S. (2017). Influence of rear-roof spoiler on the aerodynamic performance of hatchback vehicle. *MATEC Web of Conferences*, 01027.
- Chowdhury, H., Moria, H., Ali, A., Khan, I., & Alam, F. (2013). A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck. *Procedia Engineering*, 201-205.
- Cieśliński, A., Prym, W., Stajuda, M., & Witkowski, D. (2016). Investigation on Aerodynamics of super effective car for drag reduction. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 295-308.
- Cihan, B. (2019). Numerical drag reduction of a ground vehicle by NACA2415 airfoil structured vortex generator and spoiler. *International Journal of Automotive Technology*, 943-948.
- dwgmodels. (2019). BMW 7 Series CAD drawings. Obtenido de Cad-Block: <https://cad-block.com/737-bmw-7-series.html>
- Govindharanjan, R., Parammasivam, K. M., & Narayanan, S. S. (2013). Desing of Vortex Generators for Light Transport Vehicles (LTVs) using CFD. *APCWE-VIII, The Eighth Asia- Pacific Conference on Wind Engineering*, 668-673.
- Islam, R., Hossain, A., Mashud, M., & Ibny Gias, T. (2013). Drag Reduction of a Car by Using Vortex Generator. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, 1298-1302.
- Jagadeesh, M., Dubey, A., Chheniya, S., & Jadhav, A. (2013). Effect of Vortex generators on Aerodynamics of a car: CFD Analysis. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)*, 137-144.
- Naveen, S., Prakkash, V., & Kannan, S. (2015). Design of a Custom Vortex Generator Optimization of Vehicle Drag and Lift Characteristics. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 211-217.
- Rahman C., F., & Thiyagarajan, I. (2015). The Effect of Orientation of Vortex Generators on Aerodynamic Drag Reduction in Cars. *International Refereed Journal of Engineering and Science* , 13-20.
- Ranjan, P. A., Jain, A., & Alam, F. (2019). Drag reduction of a passenger car using flow control techniques. *International Journal of automotive technology*, 397-410.
- Shivam, S., Singh, S., Guleria, A., & S. Mukkamala, Y. (2015). Aerodynamic Drag Reduction of a Notchback Car Geometry by Delaying Flow Separation using Vortex Generators. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 521-524.
- Yadav, A., Rawal, P., & Mishra, R. K. (2018). Modelling and simulation of aerodynamic performance of Vortex generators for hatch back type cars. *Vibroengineering PROCEDIA*, 131-136.