

**BỘ CÔNG THƯƠNG  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



**NGÔ TIẾN CƯỜNG**

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG HÌNH DÁNG XE SUV TỚI ĐẶC  
TÍNH KHÍ ĐỘNG HỌC BẰNG ANSYS FLUENT**

**ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ ĐỘNG LỰC**

**Hà Nội – 2025**

**BỘ CÔNG THƯƠNG**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



**NGÔ TIẾN CƯỜNG**  
**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG HÌNH DÁNG XE SUV TỚI ĐẶC**  
**TÍNH KHÍ ĐỘNG HỌC BẰNG ANSYS FLUENT**

Ngành: Kỹ thuật cơ khí động lực

Mã ngành: 8520116

**ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ ĐỘNG LỰC**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN:**

**1. TS. PHẠM MINH HIẾU**

**Hà Nội – 2025**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng đề tài “**Nghiên cứu ảnh hưởng hình dáng xe SUV tới đặc tính khí động học bằng Ansys Fluent**” là công trình nghiên cứu khoa học do chính tôi thực hiện dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Phạm Minh Hiếu.

Toàn bộ nội dung trình bày trong luận văn là kết quả nghiên cứu trung thực, nghiêm túc và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác. Các số liệu, hình ảnh, biểu đồ, mô phỏng và nhận xét đều được tôi thực hiện trực tiếp hoặc trích dẫn rõ ràng nguồn tài liệu tham khảo. Mọi thông tin trích dẫn từ các tài liệu khác đều được ghi rõ nguồn gốc và sử dụng đúng theo quy định về đạo đức nghiên cứu khoa học.

Tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm trước pháp luật và hội đồng chấm luận văn về tính trung thực, chính xác và minh bạch của nội dung trong toàn bộ bản luận văn này. Nếu phát hiện có hành vi sao chép, gian lận hoặc vi phạm quy định về học thuật, tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm và chấp nhận mọi hình thức xử lý theo quy định của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

Học viên thực hiện

## MỤC LỤC

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| LỜI CAM ĐOAN .....                                                                        | i  |
| DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT .....                                              | v  |
| DANH MỤC CÁC BẢNG .....                                                                   | vi |
| DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ .....                                                                | vi |
| PHẦN MỞ ĐẦU .....                                                                         | 1  |
| 1. Lý do chọn đề tài.....                                                                 | 1  |
| 2. Tính cấp thiết của đề tài .....                                                        | 1  |
| 3. Mục tiêu của đề tài .....                                                              | 2  |
| 4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....                                                   | 2  |
| 5. Phương pháp nghiên cứu.....                                                            | 2  |
| 6. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn của đề tài.....                                     | 3  |
| CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN KHÍ ĐỘNG HỌC Ô TÔ .....                                               | 4  |
| 1.1. Khí động học ô tô.....                                                               | 4  |
| 1.1.1. Các khái niệm cơ bản.....                                                          | 4  |
| 1.1.2. Lịch sử phát triển khí động học ô tô .....                                         | 7  |
| 1.1.3. Các thành phần lực khí động học tác dụng lên vỏ xe .....                           | 16 |
| 1.2. Hình dạng vỏ xe và vai trò của nó trong việc hình thành vùng xoáy áp suất thấp ..... | 22 |
| 1.2.1. Phần đầu xe .....                                                                  | 25 |
| 1.2.2. Kính chắn gió và cột A.....                                                        | 27 |
| 1.2.3. Trần xe.....                                                                       | 29 |
| 1.2.4. Gầm xe .....                                                                       | 30 |
| 1.3. Phương pháp nghiên cứu khí động học ô tô .....                                       | 30 |
| 1.3.1. Nghiên cứu lý thuyết.....                                                          | 30 |
| 1.3.2. Nghiên cứu thực nghiệm.....                                                        | 32 |

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4. Tình hình nghiên cứu khí động học ô tô .....                                    | 34        |
| 1.4.1. Các hướng nghiên cứu truyền thống và ứng dụng hiện tại .....                  | 34        |
| 1.4.2. Những xu hướng và cải tiến gần đây trong mô phỏng khí động học ô tô .....     | 36        |
| 1.5. Kết luận chương 1 .....                                                         | 38        |
| <b>CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ PHỎNG KHÍ ĐỘNG HỌC VỎ XE BẰNG ANSYS FLUENT .....</b> | <b>39</b> |
| 2.1. Cơ sở lý thuyết khí động học .....                                              | 39        |
| 2.1.1. Các phương trình cơ bản .....                                                 | 39        |
| 2.1.2. Mô phỏng dòng chảy rối .....                                                  | 42        |
| 2.2. Mô phỏng khí động học vỏ xe bằng phần mềm ANSYS Fluent .....                    | 45        |
| 2.2.1. Hệ phương trình mô tả dòng chảy .....                                         | 45        |
| 2.2.2. Phương pháp xác định lực khí động từ mô phỏng CFD .....                       | 48        |
| 2.3. Mô hình khí động học vỏ xe SUV trong Ansys Fluent .....                         | 50        |
| 2.3.1. Mô hình 3D vỏ xe SUV .....                                                    | 50        |
| 2.3.2. Xác định vùng không gian mô phỏng .....                                       | 51        |
| 2.3.3. Chia lưới và đặt các điều kiện biên .....                                     | 55        |
| 2.4. Kết luận chương 2 .....                                                         | 62        |
| <b>CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG KHÍ ĐỘNG HỌC VỎ XE SUV BẰNG PHẦN MỀM ANSYS FLUENT .....</b>    | <b>63</b> |
| 3.1. Giới thiệu về Ansys Fluent .....                                                | 63        |
| 3.2. Thông số xe và các giả thiết của bài toán mô phỏng .....                        | 65        |
| 3.2.1. Lựa chọn thông số xe Toyota Land Cruiser .....                                | 65        |
| 3.2.2. Các giả thiết và giới hạn nghiên cứu của bài toán mô phỏng .....              | 66        |
| 3.3. Đặt các điều kiện tính toán và thiết lập thuật giải .....                       | 68        |
| 3.4. Phân tích kết quả mô phỏng .....                                                | 71        |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 3.4.1. Kết quả hệ số cản $C_d$ và hệ số nâng $C_l$ ..... | 71 |
| 3.4.2. Kết quả phân bố trường vận tốc.....               | 73 |
| 3.4.3. Phân bố trường áp suất.....                       | 76 |
| 3.4.4. Dòng chảy gần bề mặt thân xe .....                | 79 |
| 3.5. Kết luận chương 3 .....                             | 80 |
| KẾT LUẬN .....                                           | 81 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO.....                                  | 83 |

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

| Ký hiệu       | Tên gọi                                    | Đơn vị           |
|---------------|--------------------------------------------|------------------|
| $C_d$         | Hệ số cản khí động học                     | -                |
| $C_l$         | Hệ số nâng                                 | -                |
| $F_D$         | Lực cản khí động                           | N                |
| $F_L$         | Lực nâng khí động                          | N                |
| $A$           | Diện tích hình chiếu phía trước của xe     | $m^2$            |
| $\rho$        | Khối lượng riêng của không khí xung quanh. | $kg/m^3$         |
| $Re$          | Số Reynolds                                | -                |
| $Ma$          | Số Mach                                    | -                |
| $\mu$         | Độ nhớt động lực học của không khí         | $N.s/m^2$        |
| $V$           | Vận tốc dòng chảy không khí                | $m/s$            |
| $p$           | Áp suất                                    | Pa               |
| $a$           | tốc độ âm thanh trong không khí            | $m/s$            |
| $\tau_{ij}$   | Ten-sơ ứng suất của dòng rối               | -                |
| $k$           | Động năng của dòng rối                     | $J/kg (m^2/s^2)$ |
| $\varepsilon$ | Hệ số tán xạ năng lượng của dòng rối       | -                |
| $\omega$      | Hệ số tán xạ năng lượng của dòng rối       | -                |
| CFD           | Phần mềm tính toán động lực học chất lỏng  | -                |
| FEM           | Phương pháp phần tử hữu hạn                | -                |
| FVM           | Phương pháp thể tích hữu hạn               | -                |
| RANS          | Phương trình Reynolds trung bình hóa       | -                |
| SST           | Mô hình vận tải ứng suất                   | -                |

## DANH MỤC CÁC BẢNG

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Bảng 2.1. Kích thước cơ bản của xe mô phỏng..... | 59 |
| Bảng 3.1. Kết quả chia lưới tính toán.....       | 64 |
| Bảng 3.2. Thiết lập thuật giải.....              | 69 |

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Hình 1.1. Hình dáng khí động học ở phần giữa theo chiều dọc của xe khi không có gió bên .....       | 6  |
| Hình 1.2. Định nghĩa diện tích phía trước A của một chiếc xe.....                                   | 7  |
| Hình 1.3. Bốn giai đoạn chính của khí động học ô tô [14].....                                       | 8  |
| Hình 1.4. Chiếc xe phá kỷ lục của Camille Jenatzy, 1899.....                                        | 9  |
| Hình 1.5. Chiếc xe của Alfa-Romeo - Bá tước Ricotti, 1913 .....                                     | 10 |
| Hình 1.6. Chiếc xe đuôi thuyền 'Audi-Alpensieger', 1913 .....                                       | 10 |
| Hình 1.7. Hình dạng tối ưu về mặt lực cản nửa thân xe [15].....                                     | 12 |
| Hình 1.8. Ảnh hưởng của các thông số thân xe chính đến lực cản của ô tô và tương tác của chúng..... | 12 |
| Hình 1.9. So sánh ba hình dạng đuôi xe khác nhau .....                                              | 13 |
| Hình 1.10. Thân xe có lực cản khí động học thấp .....                                               | 14 |
| Hình 1.11. Dòng xe ô tô citroen đời 1956 đến 1982.....                                              | 15 |
| Hình 1.12. Xe Porsche từ 1950 đến nay .....                                                         | 15 |
| Hình 1.13. Sơ đồ lực và momen tác động lên xe .....                                                 | 16 |
| Hình 1.14. Quá trình cải thiện hình dạng khí động học ô tô.....                                     | 19 |
| Hình 1.15. Hệ số cản không khí của các loại xe thông dụng.....                                      | 20 |
| Hình 1.16. Hình ảnh phân bố lực nâng, lực cản, lực nén trên xe.....                                 | 21 |
| Hình 1.17. Các vùng xoáy trên vỏ xe ô tô con [3].....                                               | 22 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Hình 1.18. Phân bố áp suất không thứ nguyên trên vỏ xe [2].....                        | 24 |
| Hình 1.19. Dòng không khí xung quanh phần đầu ô tô .....                               | 25 |
| Hình 1.20. Sự phân bố áp suất phía trước ô tô.....                                     | 25 |
| Hình 1.21. Sự phân bố lực cản phía trước ô tô .....                                    | 26 |
| Hình 1.22. Ảnh hưởng của lực cản đến góc nghiêng của mặt trước.....                    | 26 |
| Hình 1.23. Dòng chảy xung quanh kính chắn gió.....                                     | 28 |
| Hình 1.24. Các nhân tố chính ảnh hưởng đến sự phân bố lực cản trên kính chắn gió ..... | 29 |
| Hình 1.25. Mô hình thử nghiệm trong hầm gió .....                                      | 33 |
| Hình 2.1. Mô hình 3D xe SUV .....                                                      | 51 |
| Hình 2.2. Vùng không gian mô phỏng.....                                                | 53 |
| Hình 2.3. Ví dụ về một số dạng dòng chảy ngược.....                                    | 54 |
| Hình 2.4. Chia lưới mô hình trong Ansys Fluent.....                                    | 57 |
| Hình 2.5. Các dạng phần tử lưới trong mô hình mô phỏng 3D .....                        | 57 |
| Hình 2.6. Chia lưới kiểu Poly – Hexcore.....                                           | 59 |
| Hình 3.1. Kích thước cơ bản xe Toyota Land Cruiser.....                                | 66 |
| Hình 3.2. Kết quả hệ số cản $C_d$ .....                                                | 71 |
| Hình 3.3. Kết quả hệ số cản $C_l$ .....                                                | 73 |
| Hình 3.4. Vector vận tốc trên bề mặt vỏ xe .....                                       | 73 |
| Hình 3.5. Đường dòng thể hiện vận tốc trong không gian mô phỏng .....                  | 74 |
| Hình 3.6. Phân bố vận tốc trong mặt phẳng đối xứng dọc của xe .....                    | 74 |
| Hình 3.7. Phân bố vận tốc trong mặt cắt ngang đi qua điểm giữa của vỏ xe .....         | 75 |
| Hình 3.8. Đường dòng vận tốc chạy qua xe.....                                          | 76 |
| Hình 3.9. Vector áp suất trên bề mặt vỏ xe .....                                       | 76 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Hình 3.10. Đường dòng thể hiện áp suất trong không gian mô phỏng.....      | 77 |
| Hình 3.11. Phân bố trường áp suất trên mặt phẳng đối xứng dọc.....         | 77 |
| Hình 3.12. Phân bố áp suất trong mặt cắt ngang đi qua điểm giữa vỏ xe..... | 77 |
| Hình 3.13. Phân bố áp suất trên bề mặt vỏ xe.....                          | 78 |
| Hình 3.14. Iso-surface .....                                               | 79 |

## PHẦN MỞ ĐẦU

### 1. Lý do chọn đề tài

Trong quá trình phát triển kinh tế quốc dân và nâng cao chất lượng cuộc sống, ngành công nghiệp ô tô tại Việt Nam đang có những bước tiến rõ rệt. Song song với đó, hệ thống hạ tầng giao thông, đặc biệt là mạng lưới đường bộ, cũng không ngừng được cải thiện và mở rộng. Nhiều tuyến cao tốc đã được xây dựng nhằm tăng cường tốc độ lưu thông và giảm thiểu thời gian di chuyển, góp phần thúc đẩy hiệu quả giao thông.

Tuy nhiên, khi ô tô vận hành trong không khí, chúng chịu tác động của các lực và mômen khí động học lên bề mặt thân xe. Những lực này ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng vận hành, gây gia tăng mức tiêu thụ nhiên liệu và ảnh hưởng đến sự ổn định khi di chuyển. Do đó, việc nghiên cứu và tối ưu hóa thiết kế hình dạng thân xe nhằm nâng cao hiệu suất vận hành, rút ngắn thời gian di chuyển và tăng hiệu quả sử dụng nhiên liệu là điều hết sức cần thiết. Đặc biệt, việc cải thiện đặc tính khí động học của vỏ xe được xem là một trong những hướng ưu tiên hàng đầu để nâng cao tính an toàn và tiết kiệm năng lượng.

Từ thực tế đó, đề tài: **“Nghiên cứu ảnh hưởng hình dáng xe SUV tới đặc tính khí động học bằng Ansys Fluent”** được lựa chọn nhằm góp phần làm rõ và giải quyết các vấn đề nêu trên.

### 2. Tính cấp thiết của đề tài

Trong vài năm trở lại đây, thị hiếu của người tiêu dùng ô tô tại Việt Nam có sự thay đổi rõ rệt, lượng tiêu thụ xe sedan sụt giảm, người Việt đang chuyển sự lựa chọn sang các dòng xe gầm cao 5 - 7 chỗ thuộc các phân khúc như SUV đô

thì, SUV 7 chỗ, Crossover và MPV. Theo các chuyên gia, xe gầm cao được ưa chuộng tại Việt Nam bởi tính đa dụng, có thể di chuyển nhiều địa hình, đường xấu, triều cường... trong khi nội thất rộng rãi, chở được nhiều đồ, tư thế lái thoải mái, dễ quan sát. Vì vậy, nghiên cứu lực cản khí động của xe SUV là rất cần thiết và cần được quan tâm hơn.

### **3. Mục tiêu của đề tài**

- Xây dựng thành công mô hình mô phỏng khí động học vỏ xe ô tô SUV;
- Đề xuất các giải pháp cải thiện dạng khí động học nhằm giảm thiểu lực cản khí động tác dụng lên ô tô.

### **4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- Đối tượng nghiên cứu: Xe SUV 7 chỗ với mẫu xe tham khảo cụ thể là ô tô Toyota LAND CRUISER FJ 200.
- Phạm vi nghiên cứu: Đề tài đề án tốt nghiệp tập trung nghiên cứu về lực cản khí động với tiêu chí đánh giá là hệ số cản  $C_d$  và các yếu tố ảnh hưởng đến nó trên mô hình vỏ xe “trơn” (bỏ qua gương chiếu hậu, gạt mưa, các khe gờ trên vỏ, kính, ...).

### **5. Phương pháp nghiên cứu**

Đề tài sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp mô phỏng máy tính. Nội dung chính là xây dựng mô hình vỏ xe Land Cruiser. Sau đó đưa vào tính toán và phân tích kết quả trong phần mềm ANSYS FLUENT. Cơ sở lý thuyết của mô hình tính toán là phương trình Reynolds (RANS) và hai phương trình bổ sung (mô hình STT  $k - \omega$ ) với phương pháp giải là phương pháp thể tích hữu hạn.

## **6. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn của đề tài**

Luận văn góp phần làm rõ mối quan hệ giữa hình dáng ngoại thất xe SUV và các đặc tính khí động học thông qua mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS Fluent. Thông qua việc sử dụng các công cụ mô phỏng tiên tiến, luận văn cung cấp dữ liệu khoa học giúp hiểu rõ hơn về sự phân bố áp suất, lực cản, lực nâng và dòng chảy quanh thân xe. Kết quả nghiên cứu bổ sung vào kho tàng tri thức trong lĩnh vực cơ học chất lỏng ứng dụng, đặc biệt trong ngành thiết kế xe hơi, giúp phát triển các phương pháp tối ưu hóa hình dáng xe dựa trên các thông số khí động học.

Nghiên cứu mang lại giá trị thiết thực trong việc hỗ trợ các kỹ sư và nhà thiết kế ô tô tối ưu hóa hình dáng xe SUV nhằm giảm lực cản không khí, từ đó giúp cải thiện hiệu suất nhiên liệu, giảm lượng khí thải và tăng tính ổn định của xe khi vận hành ở tốc độ cao. Kết quả từ mô phỏng có thể được ứng dụng trực tiếp trong quá trình thiết kế sản phẩm thực tế, rút ngắn thời gian thử nghiệm trong hầm gió và tiết kiệm chi phí nghiên cứu – phát triển.

### **Nội dung nghiên cứu:**

Đề án tốt nghiệp gồm các nội dung chính như sau:

Chương 1: Tổng quan khí động học ô tô

Chương 2: Cơ sở lý thuyết

Chương 3: Mô phỏng khí động học vỏ xe SUV bằng phần mềm Ansys Fluent

Kết luận và kiến nghị.

## CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN KHÍ ĐỘNG HỌC Ô TÔ

### 1.1. Khí động học ô tô

#### 1.1.1. Các khái niệm cơ bản

##### 1.1.1.1. *Khái niệm*

“Khí động lực học là môn học nghiên cứu về dòng chảy của chất khí, được nghiên cứu đầu tiên bởi George Cayley vào thập niên 1800. "Khí động học" là một nhánh của động lực học chất lưu nghiên cứu chuyển động của không khí, đặc biệt là khi nó tương tác với một đối tượng di chuyển. Khí động học đã thường được sử dụng đồng nghĩa với khí động lực, với sự khác biệt là khí động lực áp dụng đối với dòng chảy nén. Tìm hiểu về sự chuyển động của không khí (thường được gọi là một trường dòng chảy) xung quanh một đối tượng cho phép tính toán các lực, mô men lực tác động lên đối tượng. Giải pháp cho các vấn đề khí động lực học dẫn đến các tính toán về tính chất khác nhau của dòng chảy, như vận tốc, áp suất, mật độ và nhiệt độ, như là các hàm của không gian và thời gian. Khi hiểu được các tính chất này của chất khí, người ta có thể tính toán chính xác hay xấp xỉ các lực và các mômen lực lên hệ thống dòng chảy. Việc sử dụng khí động học thông qua phân tích toán học, xấp xỉ thực nghiệm và gió đường hầm thử nghiệm là cơ sở khoa học.”

Ngoài ra, ta có thể hiểu đơn giản rằng luồng gió các phân tử trong không khí chính là khí động học. Đối với ô tô, dòng không khí xung quanh sẽ tác động trực tiếp lên thân xe trong quá trình di chuyển. Hiện tượng khí động học này tạo ra lực ma sát giữa bề mặt xe và các phân tử không khí, dẫn đến lực cản chuyển động, làm giảm hiệu suất công suất của xe. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng của các yếu tố khí động học phụ thuộc vào vị trí mà lực tác dụng lên xe cũng như tốc độ

vận hành của phương tiện. Ngày nay lĩnh vực nghiên cứu khí động học trong ngành ô tô là vô cùng rộng lớn như:

- + Mô phỏng trên máy tính dòng chảy bao ngoài vỏ ô tô
- + Xác định hệ số ma sát mặt sườn
- + Mô phỏng trên máy tính quá trình điều hòa
- + Mô phỏng trên máy tính quá trình làm việc của hệ thống khí thải và làm lạnh
- + Các hệ thống thủy tốc và khí tốc áp.

#### ***1.1.1.2. Nguyên tắc cơ bản***

Các quy trình dòng chảy mà một phương tiện đang chuyển động phải chịu đựng được chia thành ba loại:

- Luồng không khí xung quanh xe;
- Luồng không khí đi qua thân xe;
- Luồng khí đi qua động cơ, khoang máy.

Hai trường luồng đầu tiên có liên quan chặt chẽ với nhau. Ví dụ, luồng không khí đi qua khoang động cơ phụ thuộc trực tiếp vào trường dòng chảy xung quanh xe. Cả hai trường phải được xem xét cùng nhau. Mặt khác, các quá trình dòng chảy bên trong động cơ và truyền động không được kết nối trực tiếp với hai quá trình đầu tiên, và không được xem xét ở đây.

Dòng chảy bên ngoài tác động lên xe các lực và mômen ảnh hưởng lớn đến hiệu suất và độ ổn định hướng của xe. Cho đến gần đây khí động học của xe hầu như chỉ quan tâm đến hai tác động này và chỉ tập trung vào nhu cầu giữ cho cửa

sổ và đèn không bị bụi bẩn và nước mưa tích tụ, để giảm tiếng ồn của gió, ngăn cản việc nâng cần gạt nước và làm mát bề chứa dầu động cơ và phanh, v.v.



*Hình 1.1. Hình dáng khí động học ở phần giữa theo chiều dọc của xe khi không có gió bên*

Lực cản khí động học  $D$ , cũng như các thành phần lực và mô men khác, tăng theo bình phương tốc độ xe  $V$ :

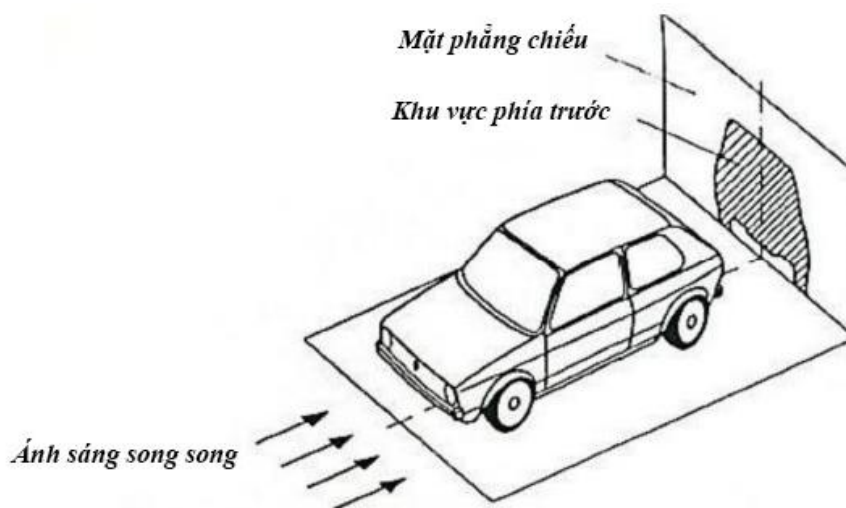
$$D \sim V^2 \quad (1.1)$$

Với một chiếc xe cỡ trung của châu Âu, lực cản khí động học chiếm gần 80% tổng lực cản trên đường ở tốc độ 100 km/h. Do đó, có nhiều phạm vi để cải thiện tính kinh tế bằng cách giảm lực cản khí động học. Vì lý do này, lực cản vẫn là tâm điểm của khí động học xe, cho dù mục tiêu là tốc độ hay tiết kiệm nhiên liệu.

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \quad (1.2)$$

Trong đó:  $C_D$  là hệ số cản không thứ nguyên;  $A$  ( $\text{m}^2$ ) là diện tích hình chiếu phía trước của xe và  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) là khối lượng riêng của không khí xung quanh.

Lực cản  $F_D$  (N) của một phương tiện được xác định bởi diện tích phía trước  $A$  và hình dạng của nó, chất lượng khí động học được mô tả bằng hệ số cản  $C_D$ . Nói chung, kích thước xe và diện tích phía trước được xác định theo yêu cầu thiết kế và nỗ lực giảm lực cản tập trung vào việc giảm hệ số cản. Sự chênh lệch áp suất giữa mặt trên và mặt dưới của xe tạo ra một lực tổng hợp, vuông góc với hướng chuyển động, được gọi là lực nâng. Theo nguyên tắc, lực nâng theo hướng đi lên, nghĩa là nó có xu hướng nâng xe lên và do đó làm giảm tải trọng hiệu quả của bánh xe. Nó được kết hợp với một khoảnh khắc dốc, ảnh hưởng khác nhau đến tải trọng của bánh xe ở phía trước và phía sau.



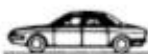
Hình 1. 2. Định nghĩa diện tích phía trước  $A$  của một chiếc xe

## 1.1.2. Lịch sử phát triển khí động học ô tô

### 1.1.2.1. Các loại xe

Lịch sử của khí động học ô tô chiếm bốn giai đoạn không rõ ràng theo thứ tự thời gian. Sự phát triển ban đầu chỉ tập trung vào lực cản, và vấn đề nhạy cảm với gió ngang chỉ nảy sinh khi tốc độ lái ngày càng tăng. Gần đây, những nỗ lực

đã được thực hiện, bằng cách tạo hình phù hợp, để loại bỏ sự lắng đọng của bụi bẩn và nước trên cửa sổ và đèn chiếu sáng.

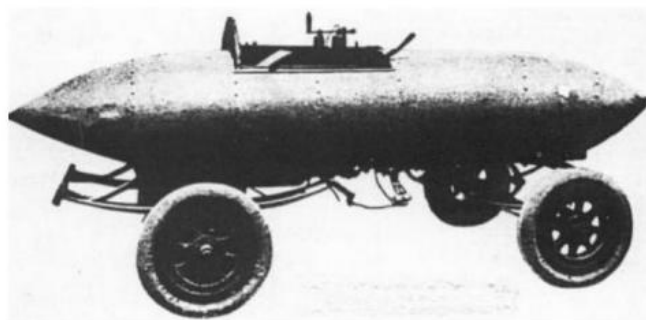
|                        |                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |
|------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Hình dạng cơ bản       | 1900 đến 1930       |    |     |   |
| Thiết kế ô tô thon gọn | 1921 đến 1923       |    |    |                                                                                      |
|                        | 1922 đến 1939       |    |                                                                                      |                                                                                      |
|                        | 1934 đến 1939       |    |    |                                                                                      |
|                        | Từ 1955             |   |   |                                                                                      |
|                        | Tối ưu hóa chi tiết | Từ 1974                                                                             |   |  |
| Tối ưu hóa hình dạng   | Từ 1983             |  |  |                                                                                      |

Hình 1.3. Bốn giai đoạn chính của khí động học ô tô [7]

#### 1.1.2.2. Hình dạng cơ bản

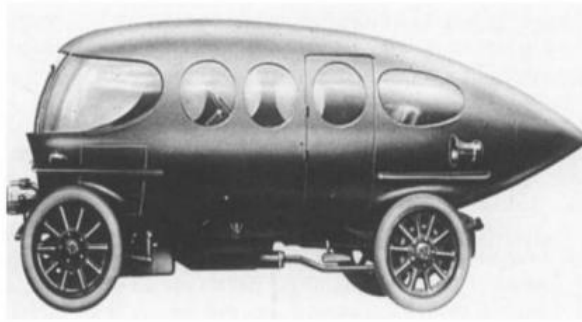
Trong giai đoạn đầu tiên, có niên đại từ đầu thế kỷ này, một nỗ lực đã được thực hiện để áp dụng cho các hình dạng tinh gọn của ô tô từ các ngành khác như kiến trúc hải quân và kỹ thuật khí cầu. Chúng rất ít phù hợp với ô tô, ví dụ như "dạng khí cầu", hoặc không hiệu quả, ví dụ như "đuôi thuyền". Do đường xấu và công suất động cơ thấp, tốc độ vẫn thấp nên lực cản khí động học chỉ đóng vai trò

phụ. Hầu hết những chiếc xe bắt nguồn từ những hình dạng cơ bản này đều có một lỗi chung: chúng đã bỏ qua thực tế là dòng chảy qua một thân xe không còn đối xứng trục khi thân xe gần mặt đất và khi bánh xe và trục xe được thêm vào. Mặc dù vậy, các hình dạng thể hiện sự tiến bộ vượt bậc về lực cản thấp hơn so với các hình dạng dựa trên xe ngựa. Chắc chắn chiếc xe lâu đời nhất được phát triển theo nguyên tắc khí động học là chiếc xe được chế tạo bởi Camille Jenatzy, người đầu tiên vượt 100 km/h với chiếc xe chạy bằng điện này vào ngày 29 tháng 4 năm 1899.



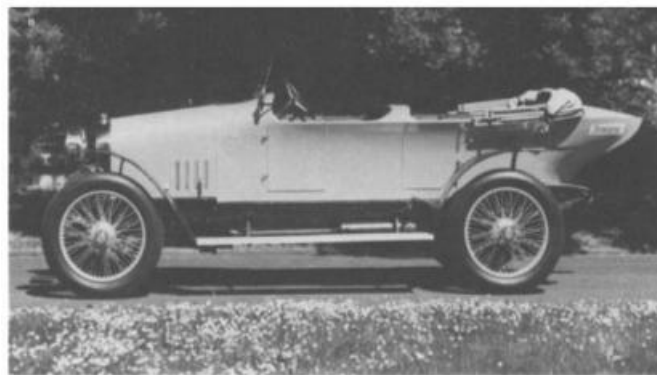
*Hình 1.4. Chiếc xe phá kỷ lục của Camille Jenatzy, 1899*

Một chiếc xe có thân hình phi thuyền, Alfa Romeo từ năm 1913. Tỷ lệ chiều dài và chiều cao của thân xe này là xấp xỉ 3. Thiết kế tương tự đã tồn tại trong đó bánh xe được bao bọc một phần bởi thân xe. Nỗ lực thiết kế một chiếc xe với một thân hình lý tưởng tích hợp đã được lặp lại nhiều lần, nhưng không thành công trong sản xuất.



*Hình 1.5. Chiếc xe của Alfa-Romeo - Bá tước Ricotti, 1913*

Cái gọi là 'đuôi thuyền' hoàn toàn không hiệu quả về mặt khí động học. Dòng chảy, ngăn cách ở phía trước và từ chắn bùn, sẽ không gắn lại vì 'đuôi thuyền' ở đuôi xe. Đuôi thuyền, được áp dụng trong các biến thể khác nhau trên xe limousine và xe thể thao sản xuất hàng loạt, là một ví dụ về cách các lập luận khí động học thường bị lạm dụng để biện minh cho sự tò mò về kiểu dáng.



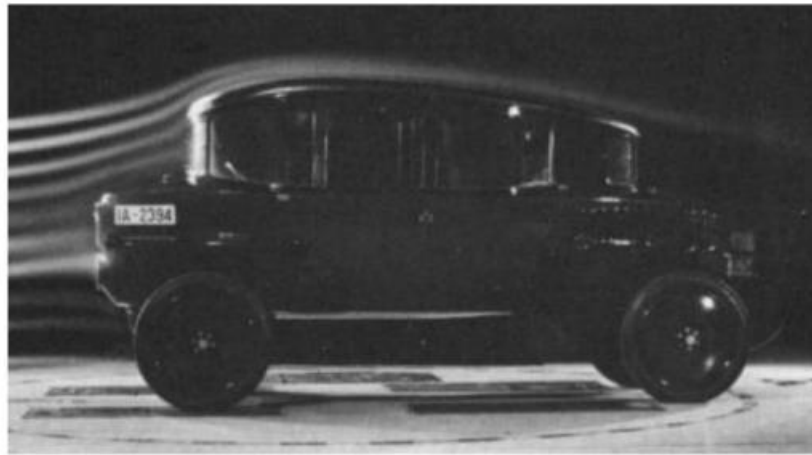
*Hình 1.6. Chiếc xe đuôi thuyền 'Audi-Alpensieger', 1913*

### **1.1.2.3. Hình dáng khí động học**

Sau Chiến tranh thế giới thứ nhất, việc thiết kế các hình dáng khí động học bắt đầu ở một số địa điểm đồng thời. E. Rumpler, người đã trở nên nổi tiếng nhờ chiếc máy bay thành công của mình, 'Rumpler-Taube', đã phát triển một số phương

tiện mà ông gọi là 'ô tô giọt nước'. Trên một chiếc xe Rumpler nguyên bản do Bảo tàng Deutsches ở Munich cung cấp, cho kết quả như sau: Diện tích mặt trước  $A = 2,57 \text{ m}^2$ ; hệ số cản  $C_d = 0,28$ .

Nhìn từ trên xuống, chiếc xe của anh ấy có hình dạng của một cánh máy bay. Nhưng trần xe cũng được thiết kế hợp lý, do đó chứng tỏ rằng Rumpler đã nhận thức được đặc tính ba chiều của trường dòng chảy.



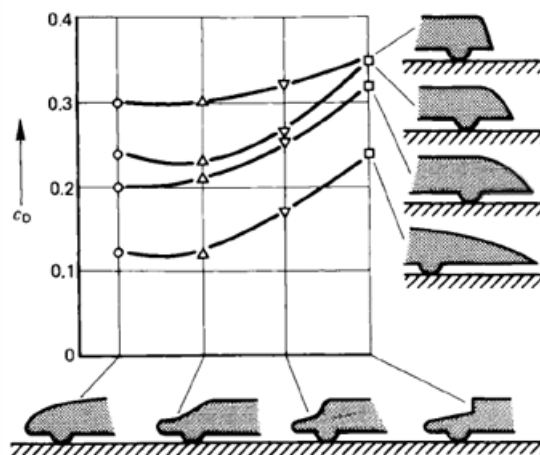
*Hình 1.7. Mô hình Rumpler Car – tính giản luồng không khí*

Các thử nghiệm trong đường hầm gió thực hiện theo yêu cầu của Jaray cho thấy lực cản của nửa thân này tăng lên khi tăng khoảng sáng gầm xe, do luồng không khí xung quanh mép dưới sắc; bằng cách làm tròn các cạnh này, có thể loại bỏ sự gia tăng này. Jaray sau đó đã cố gắng xác định gần đúng hình dạng của nửa thân xe này bằng cách lắp ráp các thân có hình dạng khí động học riêng lẻ.

|                                                                                                               | $A_{1:1} [m^2]$        | $c_D$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------|
|                              | 2.99                   | 0.64  |
| <br>Large Jaray cars         | 2.86                   | 0.30  |
| <br>Small Jaray car          | 1.87                   | 0.29  |
| <br>Half-body without wheels | 2.99                   |       |
|                                                                                                               | front with sharp edges | 0.13  |
|                                                                                                               | front edges rounded    | 0.09  |
| Half-body with wheels                                                                                         |                        | 0.15  |

Hình 1.7. Hình dạng tối ưu về mặt lực cản nửa thân xe [8]

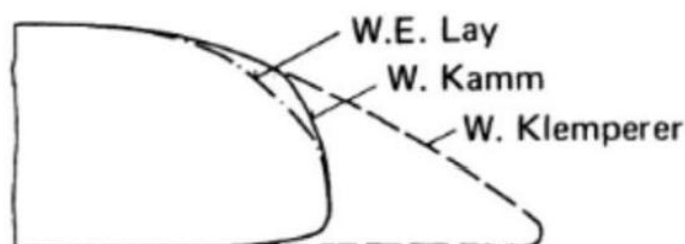
Bằng cách sửa đổi một cách có hệ thống hình dạng của chiếc xe ở phía trước và phía sau. Các cuộc điều tra cho thấy sự tương tác mạnh mẽ giữa các trường dòng chảy của thân trước và đuôi xe. Lực cản thấp của mô hình đuôi dài chỉ được duy trì khi dòng chảy xung quanh thân trước được gắn chặt. Lực cản tăng lên đáng kể khi dòng chảy tách ra ở kính chắn gió dốc. Mặt khác, nếu lực cản đã cao do phần đuôi xe ngắn thì việc tăng lực cản từ kính chắn gió dốc chỉ ở mức vừa phải.

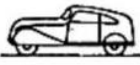
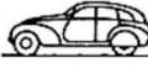
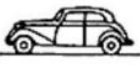


Hình 1.8. Ảnh hưởng của các thông số thân xe chính đến lực cản của ô tô và tương tác của chúng.

Ảnh hưởng của các thông số cơ thể chính đến lực cản của ô tô và tương tác của chúng Hình dạng đuôi xe cùn lần đầu tiên xuất hiện trong tác phẩm của Lay đã dẫn đến sự phát triển của 'Kamm-back', kết hợp lợi thế của khoảng không trên đầu lớn hơn ở hàng ghế sau với lợi thế của lực cản thấp. Kamm-back, Lay - back và thiết kế đuôi dài của Klemperer được so sánh với nhau.

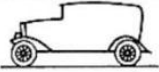
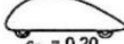
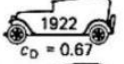
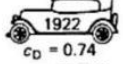
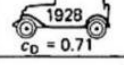
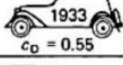
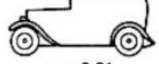
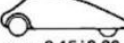
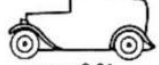
Lực cản thấp đạt được do dòng chảy được gắn vào càng lâu càng tốt và sau đó buộc phải tách ra bằng cách cắt bỏ phần đuôi xe tại một diện tích mặt cắt vốn đã giảm đi nhiều. Điều này dẫn đến một đánh thức nhỏ. Bằng cách làm thon thân xe một cách vừa phải, dòng chảy phải chịu sự gia tăng áp suất để đảm bảo rằng áp suất ở phía sau xe, 'áp suất cơ bản', tương đối cao, sau đó chính áp suất này sẽ làm giảm lực cản tổng thể.



| Loại phép đo                 | Everling, 1938                                                                                                | Kamm K5, 1939                                                                                                  | DB 170 V                                                                              |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Mẫu xe                       | <br>$A = 2.24 \text{ m}^2$ | <br>$A = 2.17 \text{ m}^2$ |  |
| Dự kiến cho xe quy mô đầy đủ | $c_D = 0.15$<br>$c_D = 0.24$                                                                                  |                                                                                                                |                                                                                       |
| Trượt xuống                  | $c_D = 0.31$                                                                                                  | $c_D = 0.24$                                                                                                   | $c_D = 0.48$                                                                          |
| Ống khí động, quy mô đầy đủ  |                                                                                                               | $c_D = 0.37$                                                                                                   | $0.52 < c_D < 0.55$<br>$\overline{c_D} = 0.55$                                        |

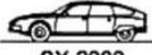
Hình 1.9. So sánh ba hình dạng đuôi xe khác nhau

Khí động học của xe ban đầu tập trung vào lực cản trong điều kiện không khí tĩnh lặng (dòng chảy đối xứng), các vấn đề về gió bên cũng như làm mát và thông gió nhanh chóng trở nên rõ ràng, kết quả cho thấy lực cản thay đổi rất ít khi tăng góc bề đối với những chiếc xe 'sắc nhọn' vốn đã có có lực cản khí động học cao, nhưng giảm mạnh sau khi tăng nhẹ với hình dáng thuôn dài.

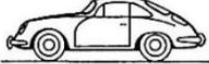
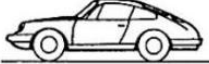
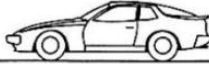
| Tác giả<br>năm quy mô           | Hình dạng bán thân được tối<br>ưu hóa                                                                                                                                                                  | Xe để so sánh                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| W.T. Fishleigh<br>1931<br>M 1:4 | <br>drag-ratio 1:2.6                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| R. H. Heald<br>1933<br>1:15     | <br>$c_D = 0.24$<br><br>$c_D = 0.20$ | <br>$c_D = 0.67$ <br>$c_D = 0.74$<br><br>$c_D = 0.71$ <br>$c_D = 0.55$ |
| W.E. Lay<br>1933<br>1:8         | <br>$c_D = 0.30 \quad 0.24 \quad 0.20 \quad 0.13$                                                                     | <br>$c_D = 0.61$                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| E.G. Reid<br>1935               | <br>$c_D = 0.15 \div 0.20$                                                                                          | <br>$c_D = 0.61$                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

Hình 1.10. Thân xe có lực cản khí động học thấp

Sự phát triển của những chiếc ô tô được sắp xếp hợp lý đã bị gián đoạn bởi Chiến tranh thế giới thứ hai. Citroen và Panhard là những nhà sản xuất ô tô duy nhất nổi lại quá trình phát triển này sau chiến tranh, GS và CX có liên quan chặt chẽ hơn với ý tưởng của Kamm (phần đuôi xe bị cắt bỏ). Cả ba mẫu xe đều có hệ số cản cực kỳ thấp so với các đối thủ cùng thời.

|                                                                                              | Năm Mô Hình | A [m <sup>2</sup> ] | c <sub>D</sub> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------|
| <br>ID 19   | 1956        | 2.14                | 0.38           |
| <br>GS      | 1970        | 1.77                | 0.37           |
| <br>CX 2000 | 1974        | 1.96                | 0.40           |
| <br>BX      | 1982        | 1.89                | 0.33 – 0.34    |

Hình 1.11. Dòng xe ô tô citroen đời 1956 đến 1982

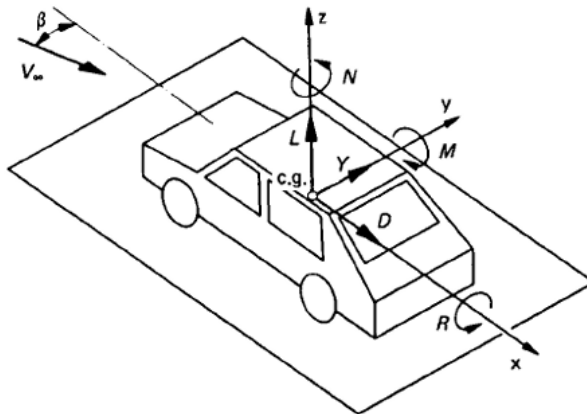
|                                                                                              | Năm Mô Hình | A [m <sup>2</sup> ] | c <sub>D</sub> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------|
| <br>356 A   | 1950        | 1.61                | 0.34           |
| <br>356 B  | 1959        | 1.61                | 0.38-<br>0.40  |
| <br>911 S | 1976        | 1.77                | 0.40           |
| <br>924   | 1975        | 1.79                | 0.33           |
| <br>944   | 1981        | 1.82                | 0.35           |
| <br>928 S | 1977        | 1.95                | 0.38           |

Hình 1.12. Xe Porsche từ 1950 đến nay

### 1.1.3. Các thành phần lực khí động học tác dụng lên vỏ xe

#### 1.1.3.1. Cơ sở mô tả dòng chảy và các thông số đặc trưng trong khí động học

Trong khí động học, đối tượng nghiên cứu chính là dòng không khí chuyển động xung quanh một vật thể đang di chuyển, thường được mô tả theo phương pháp Euler trong hệ tọa độ gắn liền với vật thể. Để đơn giản hóa việc phân tích và mô phỏng, cách tiếp cận phổ biến là chuyển đổi hệ quy chiếu: thay vì xem vật thể chuyển động trong không khí đứng yên, ta giả định vật đứng yên và dòng khí chuyển động với vận tốc tương đương. Sự thay đổi này không làm ảnh hưởng đến kết quả phân tích mà giúp thuận tiện hơn trong việc mô hình hóa và tính toán các thông số khí động học.



Hình 1.13. Sơ đồ lực và momen tác động lên xe

Trong nghiên cứu khí động học, hai thông số không thứ nguyên thường xuyên được sử dụng để mô tả đặc tính của dòng chảy không khí là số Reynolds (Re) và hệ số Mach (Ma). Các đại lượng này phản ánh những khía cạnh khác nhau của dòng chảy, từ đặc tính nhớt, nén được cho đến dao động theo thời gian. Mỗi thông số đều phụ thuộc vào một số yếu tố như vận tốc dòng chảy, kích thước hình

học đặc trưng của vật thể, tần số dao động, độ nhớt và khối lượng riêng của chất lỏng.

- Công thức số Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (1.3)$$

Trong đó:

- $\rho$ : khối lượng riêng của không khí ( $\text{kg/m}^3$ )
- $U$ : vận tốc đặc trưng của dòng chảy ( $\text{m/s}$ )
- $L$ : chiều dài đặc trưng (ví dụ: chiều dài xe, đường kính ống, v.v.) ( $\text{m}$ )
- $\mu$ : độ nhớt động lực học của không khí ( $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ )

Số Reynolds cho biết loại dòng chảy là ổn định (chảy tầng) hay rối (chảy rối). Khi  $Re < 2.000$ , dòng chảy thường ổn định; khi  $Re > 4.000$ , dòng chảy có xu hướng chuyển sang rối. Đây là thông số cực kỳ quan trọng trong việc lựa chọn mô hình dòng rối phù hợp khi mô phỏng CFD.

- Công thức hệ số Mach

$$Ma = \frac{U}{a} \quad (1.4)$$

Trong đó:

- $U$ : vận tốc dòng khí ( $\text{m/s}$ )
- $a$ : tốc độ âm thanh trong không khí ( $\text{m/s}$ )

Giá trị của hệ số Mach cho biết mức độ nén được của dòng khí:

- $Ma < 0,3$ : dòng chảy gần như không nén được (incompressible)
- $Ma = 0,3 - 0,8$ : dòng chảy cận âm (subsonic)

- $Ma \approx 1$ : dòng chảy siêu âm cục bộ (transonic)
- $Ma > 1$ : dòng chảy siêu âm (supersonic)

Trong khí động học ô tô, đa số các bài toán đều có  $Ma < 0,3$ , do đó có thể coi không khí là chất lỏng không nén được trong mô phỏng. [9]

#### **1.1.3.2. Lực cản không khí**

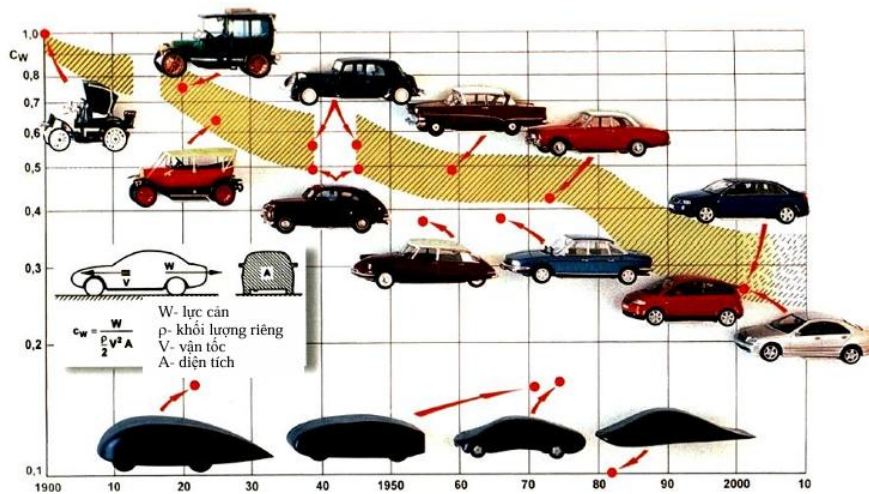
Theo lý thuyết, lực cản khí động được xác định theo công thức:

$$F_D = C_d \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \quad (1.5)$$

Trong đó:

- $F_D$  là lực cản khí động (N)
- $A$  là diện tích cản chính diện ( $m^2$ )
- $C_d$  là hệ số cản
- $\rho$  là mật độ không khí ( $kg/m^3$ )
- $V$  là vận tốc dòng khí chuyển động (m/s)

Từ công thức trên, khối lượng riêng của không khí  $\rho$  là thông số không đổi. Để giảm lực cản  $F_D$ , nếu giảm diện tích cản chính diện  $A$  thì không gian sử dụng bị giảm, còn nếu giảm vận tốc  $V$  thì sẽ làm giảm năng suất vận chuyển. Như vậy, giảm  $C_d$  đồng nghĩa với việc cải thiện hình dạng khí động học của ô tô. Quá trình hoàn thiện dạng khí động học vỏ xe ô tô con theo lịch sử phát triển được mô tả trên hình 1.14 [1].

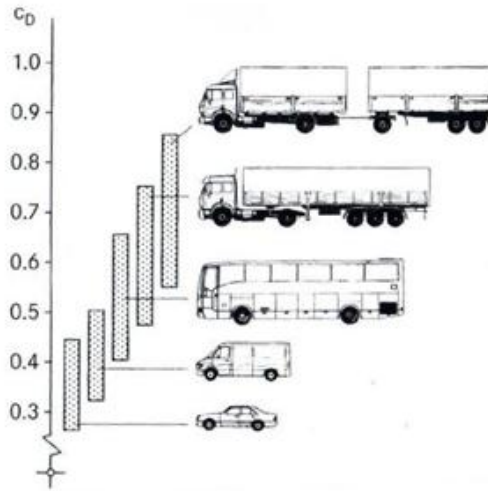


Hình 1.14. Quá trình cải thiện hình dạng khí động học ô tô nhằm giảm hệ số cản

Tương tự như các cỗ xe ngựa cổ, những mẫu ô tô đầu tiên có hệ số cản (ký hiệu là  $C_w$  trên hình) rất cao, dao động trong khoảng 0,65 đến 1,0. Tuy nhiên, đến thập niên 1970, chỉ số này đã giảm đáng kể, còn khoảng 0,4. Ngày nay, nhờ những tiến bộ về thiết kế khí động học, hệ số  $C_d$  đã được hạ xuống mức từ 0,28 đến 0,32, và thậm chí một số mẫu xe hiện đại có thể đạt giá trị thấp hơn, khoảng 0,25 đến 0,27 [4]. Tuy nhiên, kể từ sau năm 2000, khi hình dáng ô tô đã tiệm cận đến mức tối ưu về mặt khí động học, việc giảm thêm dù chỉ 0,01 đơn vị trong hệ số  $C_d$  trở nên vô cùng khó khăn. Điều này đòi hỏi phải có các nghiên cứu sâu rộng hơn, hệ thống thử nghiệm hiện đại hơn và chi phí đầu tư cao hơn đáng kể.

Trong tự nhiên, giọt nước rơi tự do trong không khí là ví dụ điển hình cho hình dạng khí động học tối ưu. Nếu ô tô có thể được thiết kế theo hình dạng đó, lực cản không khí tác dụng lên xe sẽ giảm xuống mức tối thiểu. Thực tế, phần dưới của hình 1.15 minh họa một số thiết kế vỏ xe có hệ số cản thấp hơn 0,2, thậm chí có thể đạt tới 0,1. Tuy nhiên, những kiểu dáng này lại không phù hợp với thị hiếu thẩm mỹ và nhu cầu sử dụng của người tiêu dùng hiện đại, do đó chúng rất hiếm

khi được áp dụng trong sản xuất đại trà, mà chủ yếu chỉ xuất hiện trên các dòng xe đua chuyên dụng.



*Hình 1.15. Hệ số cản không khí của các loại xe thông dụng*

Tuy nhiên, đối với các nhà sản xuất thì việc tạo dáng không chỉ nhằm vào mục đích giảm tối đa lực cản khí động mà còn phải đạt được tính thẩm mỹ cao. Chính vì vậy, vẫn tồn tại những dạng vỏ xe có hình dáng vuông vắn, góc cạnh tiếp nhận lực cản khí động lớn với hệ số  $C_d$  lớn hơn 0,7. Bên cạnh đó, vẫn có những chiếc ô tô khách với vỏ xe có thể đạt tới  $C_d$  xấp xỉ 0,4 và thậm chí là nhỏ hơn.

### **1.1.3.3. Lực nâng không khí**

“Theo lý thuyết của khí động học, luồng không khí phía dưới gầm xe sẽ di chuyển một quãng đường ngắn hơn so với luồng không khí phía trên mui xe khi xe chuyển động. Tuy nhiên, theo nguyên lý Bernoulli thì quãng đường di chuyển của luồng không khí phía trước sẽ hơn phía sau. Vận tốc khác nhau của các dòng không khí sẽ có sự chênh lệch và tạo nên một lực nâng có phương vuông góc với bề mặt đường. Lực nâng này sẽ làm giảm độ bám đường của xe khi di chuyển.”

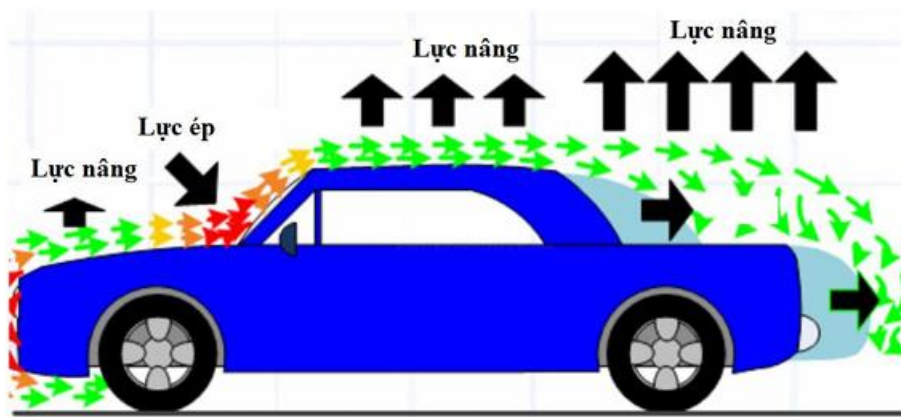
$$F_L = C_L \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \quad (1.6)$$

Trong đó:

$F_L$  là lực nâng khí động (N)

$C_L$  là hệ số lực nâng

Lực nâng hay nén: Có thể cùng lúc xuất hiện ở nhiều vị trí khác nhau và tác dụng vào chuyển động của xe.



Hình 1.16. Hình ảnh phân bố lực nâng, lực cản, lực nén trên xe

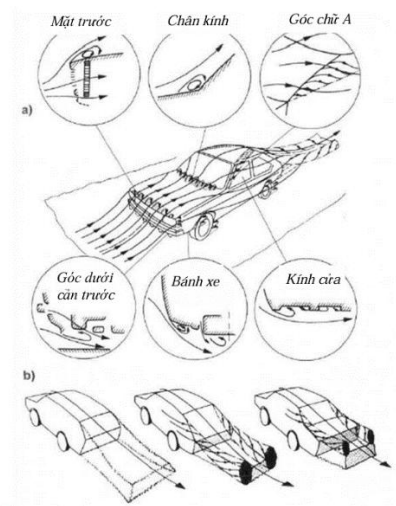
Cả hai loại lực nén và lực nâng đều đóng vai trò quan trọng đối với sự ổn định trong quá trình vận hành của xe, miễn là chúng không vượt quá giới hạn cho phép. Trên các mẫu xe đua, thân xe thường được thiết kế để tạo ra lực nén, giúp tăng độ bám đường và cải thiện khả năng điều khiển ở tốc độ cao. Ngược lại, ở các dòng xe du lịch thông thường, thiết kế thân xe có xu hướng tạo ra lực nâng nhằm giảm lực cản và hỗ trợ xe di chuyển nhẹ nhàng hơn.

Khi không khí bị nén ở phần đầu xe và dần dần nở về phía sau, nó tạo nên vùng áp suất thấp dọc theo thân xe, góp phần sinh ra lực nâng. Lực nâng đạt giá trị lớn nhất ở phần đuôi xe, nơi tiết diện cản gió giảm đột ngột, khiến dòng khí

tách khỏi bề mặt xe. Nếu lực nâng này vượt quá giới hạn cho phép, nó có thể làm giảm đáng kể độ bám đường của bánh sau, ảnh hưởng đến khả năng vận hành an toàn của phương tiện.

## 1.2. Hình dạng vỏ xe và vai trò của nó trong việc hình thành vùng xoáy áp suất thấp

Khi xe ô tô di chuyển trong không khí, sự tương tác giữa luồng không khí và hình dáng vỏ xe sẽ tạo ra các vùng xoáy có áp suất thấp. Bên cạnh vùng xoáy lớn thường xuất hiện phía sau đuôi xe như đã đề cập, còn tồn tại nhiều xoáy nhỏ khác phân bố trên bề mặt thân xe, và chính những xoáy này góp phần làm tăng lực cản khí động. Để giảm thiểu lực cản này, cần nghiên cứu các giải pháp nhằm hạn chế sự xuất hiện hoặc thu nhỏ kích thước của các vùng xoáy đó.



*Hình 1.17. Các vùng xoáy trên vỏ xe ô tô con [3]*

a) Các vùng xoáy trên vỏ xe; b) Vùng xoáy sau đuôi xe

Hình 1.17 minh họa một ví dụ cụ thể về hiện tượng hình thành các vùng xoáy quanh thân xe. Các xoáy khí này chủ yếu xuất hiện tại những vị trí có sự thay đổi đột ngột về hình dạng bề mặt, như các góc gấp, rìa hoặc cạnh vát trên vỏ xe,

khí khiến luồng không khí bị rối loạn. Trong phần đầu của Hình 1.17a, có thể thấy vùng xoáy phát sinh ngay phía trên nắp capo, nơi đầu xe tương tác mạnh với dòng khí đi tới. Bên cạnh đó, luồng không khí đi qua khu vực kết làm mát cũng góp phần gây ra lực cản.

Ngoài ra, các vị trí như chân kính chắn gió, cột chữ A, vùng bánh xe và một số điểm giao nhau khác trên vỏ xe cũng tạo nên các vùng xoáy nhỏ, ảnh hưởng đáng kể đến lực cản khí động tổng thể. Để hạn chế tác động bất lợi này, cần áp dụng các giải pháp thiết kế khí động học nhằm điều hướng luồng khí một cách mượt mà hơn.

Ở phần sau xe, hình 1.17b cho thấy vùng xoáy lớn phía đuôi có mối liên hệ mật thiết với hình dáng và độ dốc của kết cấu đuôi xe. Ba ví dụ được minh họa thể hiện các kiểu thiết kế khác nhau dẫn đến kích thước và hình dạng vùng xoáy không giống nhau. Trong đó, kiểu dáng đuôi xe kéo dài và thuôn về sau giúp giảm thiểu hiện tượng tách dòng, từ đó làm giảm lực cản khí động đáng kể.

Để phân tích sự phân bố áp suất cũng như đánh giá ảnh hưởng của các vùng xoáy áp thấp trên bề mặt ô tô, người ta thường sử dụng biểu đồ phân bố áp suất không thứ nguyên, được ký hiệu là  $C_p$ . Biểu thức tính như sau:

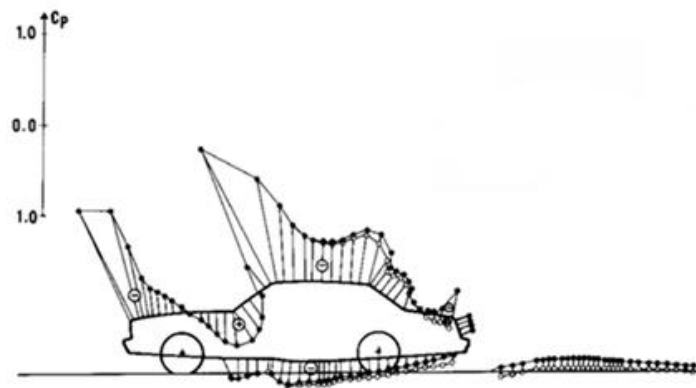
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (1.7)$$

Trong đó:

- $p$  là áp suất tại điểm khảo sát trên bề mặt xe (Pa);

- $p_{\infty}$  (Pa) và  $V_{\infty}$  (m/s) lần lượt là áp suất và vận tốc tại vị trí dòng khí không bị ảnh hưởng bởi sự hiện diện của xe (thường gọi là điều kiện môi trường xung quanh hoặc điểm chuẩn);
- $\rho$  là mật độ không khí. ( $\text{kg/m}^3$ )

Hình 1.18 minh họa ví dụ về cách áp suất không thứ nguyên phân bố quanh thân một chiếc ô tô con. Từ biểu đồ có thể nhận thấy, kính chắn gió là nơi chịu tác động trực tiếp từ dòng khí va chạm, do đó áp suất tại đây cao hơn so với áp suất tại điểm chuẩn, dẫn đến giá trị  $C_p$  dương. Ngược lại, những vùng có giá trị  $C_p$  âm thường là kết quả của hiện tượng xoáy khí gây ra giảm áp suất cục bộ. Thông qua biểu đồ phân bố  $C_p$ , người ta có thể suy ra được các đại lượng khí động học quan trọng như lực cản chuyển động và lực nâng tác động lên xe, từ đó hỗ trợ việc tối ưu hóa thiết kế khí động học cho phương tiện.

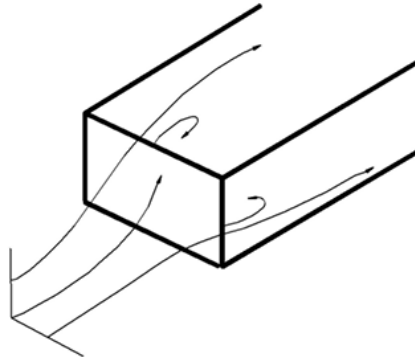


*Hình 1.18. Phân bố áp suất không thứ nguyên trên vỏ xe [2]*

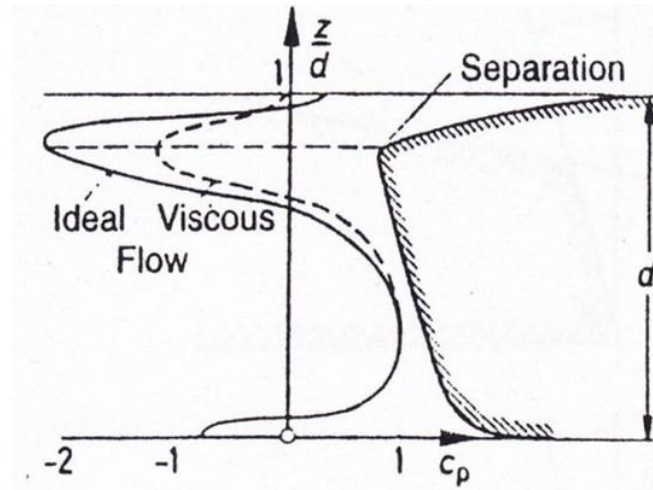
Lực cản thường xuất hiện ở các vị trí phần đầu, kính chắn gió, cột A, đuôi, gầm, nóc, bánh xe... Phân tích từng trường hợp cụ thể như sau:

### 1.2.1. Phần đầu xe

Phần đầu ô tô có thể xem như một khối vuông. Dòng không khí xung quanh khối này được mô tả trên hình 1.19. Để đơn giản, dòng không khí làm mát đi vào ô tô được giả thiết là bị chặn lại.



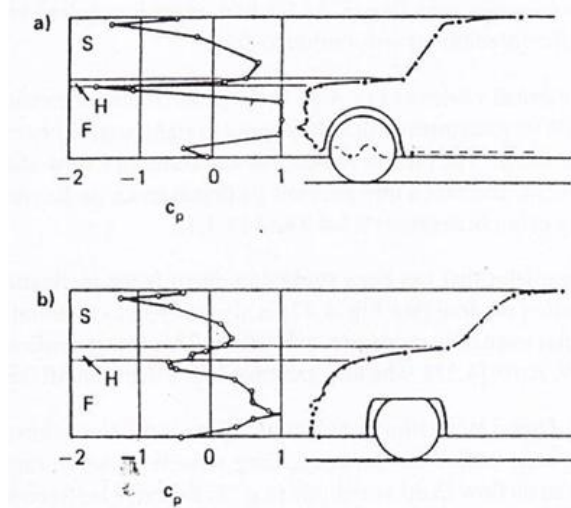
Hình 1.19. Dòng không khí xung quanh phần đầu ô tô



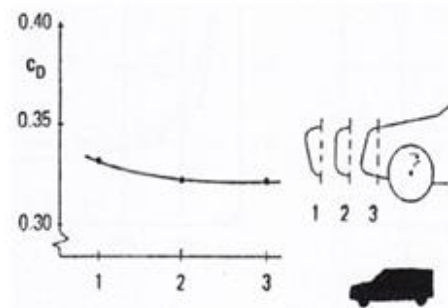
Hình 1.20. Sự phân bố áp suất phía trước ô tô

Dòng chảy không khí khi tiếp xúc với bề mặt thẳng đứng phía trước xe sẽ tạo ra điểm tách dòng. Do luồng không khí có xu hướng chuyển động lên phía trên và sang hai bên thân xe nhiều hơn là chảy xuống dưới gầm, nên hướng chuyển

động của dòng khí này gần như song song với hướng di chuyển của xe. Tại vùng tiếp giáp giữa mặt trước, capo và chắn bùn, dòng khí bị lệch đáng kể. Nếu không có các giải pháp thiết kế hợp lý, hiện tượng tách dòng sẽ xảy ra tại các vị trí này, dẫn đến phân bố áp suất không đều—đặc biệt là áp suất tại các mép đầu capo và chắn bùn thấp hơn so với dòng chảy lý tưởng (xem hình 1.20). Điều này làm gia tăng áp suất tổng thể ở đầu xe và sinh ra một phần lực cản khí động.



Hình 1.21. Sự phân bố lực cản phía trước ô tô



Hình 1.22. Ảnh hưởng của lực cản đến góc nghiêng của mặt trước

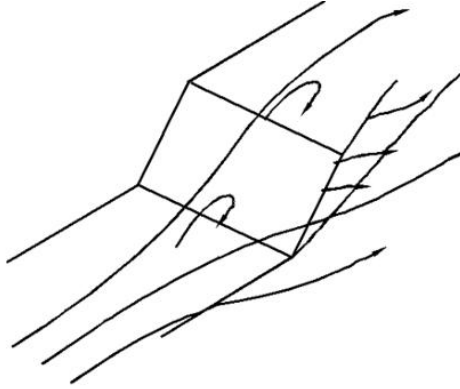
Hình dáng của phần đầu xe có ảnh hưởng rõ rệt đến sự phân bố lực cản này, như được thể hiện trên hình 1.21. Để hạn chế hiện tượng tách dòng gây ra bởi sai

lệch hình học so với cấu trúc lý tưởng, một số thông số thiết kế cần được chú trọng. Trong mặt cắt dọc, các yếu tố quan trọng bao gồm độ nghiêng của mũi xe, độ nghiêng của capo và bán kính bo tròn tại góc nối giữa capo với mặt trước. Trong hình chiếu đứng, độ côn và bán kính bo mép cũng đóng vai trò đáng kể. Việc tăng bán kính bo tròn tại cạnh trước giúp giảm nhanh lực cản của phần đầu xe. Khi bán kính đạt đến một giá trị tối ưu, hiện tượng tách dòng gần như bị loại bỏ và dòng khí thực tế tiệm cận với dòng khí lý tưởng, từ đó giảm đáng kể lực cản do phần đầu xe gây ra.

Thông số hình học thứ hai cần xem xét là góc nghiêng của mũi xe. Mặc dù góc nghiêng có ảnh hưởng nhất định đến lực cản, nhưng sau một ngưỡng nhất định, hiệu quả giảm lực cản sẽ bão hòa – tức là không còn thay đổi rõ rệt khi góc nghiêng tiếp tục giảm. Thông số cuối cùng là góc nghiêng của mặt trước xe, tuy có tác động đến lực cản nhưng thường không đáng kể, có thể do phần lớn các thiết kế hiện nay đã sử dụng bán kính bo góc lớn để giảm thiểu ảnh hưởng này (xem hình 1.22).

### **1.2.2. Kính chắn gió và cột A**

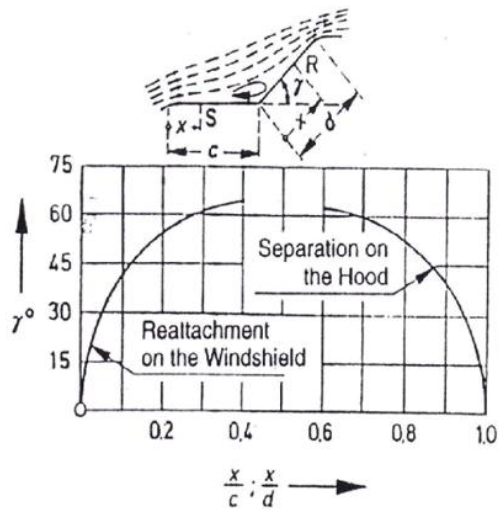
Sơ đồ của dòng chảy xung quanh kính chắn gió được hiển thị trong hình 1.23. Sự tách dòng xuất hiện ở ba vị trí khác nhau.



*Hình 1.23. Dòng chảy xung quanh kính chắn gió*

“Những nhân tố chính ảnh hưởng đến sự phân bố lực cản trên kính chắn gió được làm rõ trong hình 1.23. Hai trong số chúng, độ đảo và bán kính cột A đã được phân tích chi tiết hơn. Bán kính cột A không chỉ liên quan đến lực cản mà còn liên quan đến tiếng ồn gió.

Khi tăng góc nghiêng kính chắn gió, lực cản sẽ giảm nhưng không nhiều. Với các góc nghiêng lớn  $\delta > 60$  gần như không có sự cải thiện về lực cản. Ngoài ra khi kính chắn gió có góc nghiêng lớn sẽ gây ra một số vấn đề liên quan đến khả năng quan sát và nhiệt độ cao trong buồng lái.”



Hình 1.24. Các nhân tố chính ảnh hưởng đến sự phân bố lực cản trên kính chắn gió

Góc nghiêng kính chắn gió ảnh hưởng gián tiếp đến lực cản. Góc nghiêng lớn tạo ra ít áp lực ngược hơn ở phần tiếp xúc với nóc. Ngoài ra khi góc nghiêng kính lớn hơn, không khí bị đẩy ra phía cột A sẽ ít hơn và vì vậy dòng xoáy tạo ra sẽ tiêu tốn ít năng lượng hơn.

### 1.2.3. Trần xe

“Trần xe cũng là phần chịu tác động của lực cản. Hệ số cản có thể giảm bằng cách làm tăng độ cong của trần xe theo chiều dọc. Tuy nhiên nếu độ cong quá lớn thì hệ số cản  $C_d$  lại có thể tăng. Những ảnh hưởng thuận lợi của sự tạo vòm phụ thuộc vào sự duy trì đủ độ lớn bán kính cong tại vị trí giữa kính chắn gió phía trước với trần xe và giữa trần xe với kính chắn gió phía sau. Vì vậy các áp lực ngược tại các vị trí này không lớn và độ chênh lệch áp suất tương ứng nhỏ.

Tuy nhiên khi thiết kế độ cong của trần xe phải đảm bảo diện tích mặt trước của chiếc xe không đổi, nếu không lực cản sẽ tăng mặc dù đã giảm hệ số cản  $C_d$ .”

#### **1.2.4. Gầm xe**

Mặt dưới của phần lớn các loại xe hiện nay vẫn còn thô nhám và không được tối ưu hóa về mặt khí động học. Trên thực tế, việc làm phẳng và nhẵn gầm xe có thể góp phần giảm đáng kể lực cản không khí. Tuy nhiên, việc cải thiện bề mặt gầm xe theo hướng này thường gặp nhiều khó khăn do thiết kế phức tạp, yêu cầu kỹ thuật cao và chi phí sản xuất tăng lên, khiến việc áp dụng rộng rãi trở nên hạn chế.

### **1.3. Phương pháp nghiên cứu khí động học ô tô**

Hiện nay, trong lĩnh vực khí động học ô tô thường sử dụng hai phương pháp nghiên cứu khí động học ô tô: phương pháp nghiên cứu lý thuyết và phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.

#### **1.3.1. Nghiên cứu lý thuyết**

Phương pháp lý thuyết trong khí động học ô tô dựa trên việc sử dụng các mô hình toán học và nguyên lý cơ học chất lỏng để phân tích dòng khí tác động lên bề mặt xe. Công cụ phổ biến nhất hiện nay cho phương pháp này là CFD – Computational Fluid Dynamics (Động lực học chất lỏng tính toán).

Phương pháp lý thuyết không yêu cầu thực hiện thí nghiệm vật lý trực tiếp, mà thay vào đó sử dụng các phần mềm mô phỏng để tính toán phân bố vận tốc, áp suất, lực cản và sự hình thành xoáy khí quanh thân xe. Một số phần mềm CFD phổ biến hiện nay gồm:

- ANSYS Fluent
- STAR-CCM+
- OpenFOAM

- SimScale, v.v

Các phần mềm này giải hệ phương trình Navier-Stokes, phương trình liên tục và năng lượng bằng phương pháp số để dự đoán chính xác dòng chảy không khí quanh thân xe.

Hiện nay, hai phương pháp tính toán được sử dụng phổ biến nhất trong lĩnh vực mô phỏng dòng chảy khí động học là phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và phương pháp thể tích hữu hạn (FVM). Mỗi phương pháp đều có những đặc điểm riêng biệt, phù hợp với từng mục tiêu nghiên cứu và ứng dụng cụ thể.

Phương pháp phần tử hữu hạn được đánh giá cao nhờ khả năng cung cấp kết quả có độ chính xác lớn. Một trong những lợi thế nổi bật của phương pháp này là khả năng áp dụng các điều kiện biên thực tế, cùng với sự linh hoạt trong việc chia lưới, kể cả ở những vùng hình học phức tạp. Tuy nhiên, FEM cũng đi kèm với những hạn chế như:

- Yêu cầu tài nguyên phần cứng lớn, đặc biệt về dung lượng bộ nhớ.
- Thời gian tính toán kéo dài, nhất là khi mô hình có nhiều phần tử nhỏ.
- Khó khăn trong việc tạo lưới tại các vùng lớp biên (boundary layer).
- Quá trình xây dựng mô hình tính toán tương đối phức tạp, đòi hỏi kỹ năng chuyên sâu.

Phương pháp thể tích hữu hạn lại được ưa chuộng nhờ sự đơn giản và hiệu quả trong nhiều trường hợp ứng dụng kỹ thuật. Một số ưu điểm của FVM bao gồm:

- Tiết kiệm bộ nhớ hơn so với FEM.

- Mô hình hóa dễ dàng hơn, phù hợp với các nghiên cứu thực tiễn và ứng dụng.
- Thời gian tính toán ngắn hơn, nhờ cấu trúc đơn giản của lưới và thuật toán.

Tuy nhiên, FVM cũng có những nhược điểm cần lưu ý:

- Việc xây dựng lưới chưa được chuẩn hóa hoàn toàn.
- Các điều kiện biên áp dụng trong mô hình thường mang tính giả định, chưa phản ánh sát thực tế như FEM.

Sự phát triển của các phần mềm thương mại như ANSYS Fluent đã giúp mở rộng khả năng tiếp cận CFD cho nhiều kỹ sư và nhà nghiên cứu. Fluent sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn để giải các bài toán khí động học một cách hiệu quả, đơn giản hóa quá trình thiết lập mô hình và tính toán. Đây là lựa chọn phổ biến trong các nghiên cứu ứng dụng không yêu cầu độ chính xác tuyệt đối.

### **1.3.2. Nghiên cứu thực nghiệm**

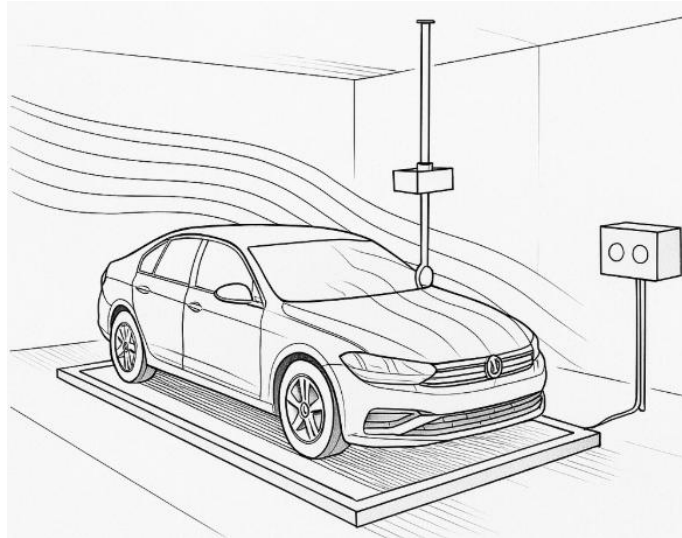
Phương pháp thực nghiệm là cách tiếp cận truyền thống nhưng vẫn rất quan trọng trong việc nghiên cứu khí động học ô tô. Phương pháp này dựa trên việc đo lường trực tiếp các thông số khí động thông qua mô hình thực tế hoặc mô hình thu nhỏ của xe. Hai hình thức phổ biến là:

#### ***1.3.2.1. Thử nghiệm trong hầm gió***

Trong loại thử nghiệm này, một mô hình ô tô (hoặc ô tô thật) được đặt cố định bên trong hầm gió, nơi dòng khí nhân tạo được thổi qua với tốc độ tương đương như trong điều kiện vận hành thực tế. Một số yếu tố được đo lường bao gồm:

- Hệ số cản khí động  $C_d$

- Lực nâng khí động và lực cản
- Phân bố áp suất trên bề mặt thân xe
- Hành vi của các dòng xoáy ở phần đuôi, bánh xe và gầm xe



*Hình 1.25. Mô hình thử nghiệm trong hầm gió*

#### **1.3.2.2. Thử nghiệm ngoài thực địa**

Trong một số trường hợp, ô tô được thử nghiệm trực tiếp trên đường hoặc tại các khu vực thử nghiệm chuyên biệt. Thiết bị đo được lắp đặt lên xe bao gồm:

- Cảm biến đo lực cản và lực nâng
- Hệ thống GPS tốc độ cao
- Máy đo vận tốc và gia tốc
- Các ống Pitot và cảm biến áp suất để đo trực tiếp các biến động dòng khí.

Mặc dù dữ liệu thu được có thể bị ảnh hưởng bởi điều kiện môi trường như gió, nhiệt độ và độ ẩm, nhưng đây là phương pháp rất hữu ích để đánh giá hiệu suất khí động trong điều kiện vận hành thực tế. Phương pháp thực nghiệm đóng vai trò then chốt trong việc kiểm chứng và hiệu chỉnh các giả thuyết và mô hình

khí động học. Khi kết hợp với phương pháp mô phỏng lý thuyết, nó mang lại một cái nhìn toàn diện và chính xác trong quá trình thiết kế và cải tiến khí động học cho ô tô.

#### **1.4. Tình hình nghiên cứu khí động học ô tô**

##### **1.4.1. Các hướng nghiên cứu truyền thống và ứng dụng hiện tại**

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu trong lĩnh vực khí động học ô tô vẫn tiếp tục được đẩy mạnh, đặc biệt tập trung vào việc nâng cao tính chính xác của các mô hình mô phỏng lý thuyết và các phương pháp thực nghiệm. Mục tiêu chung là xây dựng được các điều kiện tính toán và thử nghiệm tiệm cận hơn với môi trường hoạt động thực tế của phương tiện.

Về mặt lý thuyết, một trong những thách thức lớn nhất hiện nay là mở rộng phạm vi giải quyết của bài toán sang các cấp độ phức tạp cao hơn, với mục tiêu cuối cùng là tiếp cận gần hơn việc giải hệ phương trình Navier–Stokes đầy đủ. Trước đây, các nghiên cứu chủ yếu dựa vào phương pháp sai phân hữu hạn để xử lý các mô hình dòng chảy lý tưởng như bài toán phẳng theo phương trình Euler [4]. Tuy nhiên, xu hướng hiện tại lại tập trung vào việc ứng dụng phương pháp trung bình Reynolds để mô hình hóa dòng chảy rối – còn gọi là mô hình RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes).

Các kết quả công bố trong thời gian gần đây cho thấy, mô hình RANS vẫn là một trong những công cụ chủ lực được các nhà nghiên cứu khí động học ô tô tin dùng [1–3], nhờ khả năng cân bằng tốt giữa độ chính xác và chi phí tính toán trong mô phỏng dòng chảy rối phức tạp.

Trong lĩnh vực nghiên cứu khí động học ô tô, nhiều công trình lý thuyết đã được thực hiện với mục tiêu tối ưu hóa thiết kế nhằm giảm lực cản không khí. Tiêu biểu, nhóm tác giả do R. K. Petkar đứng đầu đã tiến hành mô phỏng khí động học ô tô dựa bằng phần mềm ANSYS Fluent, qua đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật giúp hạ thấp lực cản khí động [18]. Cùng với đó, một số tác giả khác như Manan Desai (2008) [19] cũng đã ứng dụng phần mềm này để nghiên cứu và đánh giá đặc tính dòng chảy xung quanh thân xe, từ đó hỗ trợ cho quá trình cải tiến thiết kế vỏ xe nhằm nâng cao hiệu quả khí động học.

Mặc dù vấn đề giảm lực cản khí động đã được đề cập và nghiên cứu trong nhiều thập kỷ qua, song đây vẫn là một trong những hướng ưu tiên hàng đầu trong thiết kế ô tô hiện đại, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu tiết kiệm nhiên liệu ngày càng cao. Các giải pháp thường tập trung vào việc hạn chế sự hình thành hoặc thu hẹp kích thước của các vùng xoáy, đặc biệt là ở phần đuôi xe, nơi tạo ra lực cản đáng kể nhất. Theo đó, những điều chỉnh về góc nghiêng mặt sau, góc vát bên, và bán kính bo tròn giữa các bề mặt được cho là có tác dụng rõ rệt trong việc cải thiện hiệu suất khí động học [10, 11, 13].

Tại Việt Nam, một số nghiên cứu ứng dụng cũng đã được triển khai nhằm khảo sát và cải thiện tính khí động học của vỏ xe. Tác giả Tô Hoàng Tùng (2016) đã thực hiện mô phỏng khí động học cho xe khách cỡ lớn sản xuất trong nước bằng ANSYS Fluent, với bài toán được xây dựng dựa trên phương trình Navier–Stokes trung bình hóa (RANS), giả thiết chất khí không nén và áp dụng mô hình dòng rối nhớt [2].

Tiếp đó, Đặng Tiến Phúc và cộng sự (2018) đã phân tích đặc tính khí động lực học của một mẫu xe buýt tại Việt Nam thông qua mô phỏng trường dòng chảy

và áp suất bằng phần mềm CFD thương mại. Phương pháp sử dụng là phương trình RANS kết hợp mô hình rối Realizable  $k-\epsilon$ . Kết quả nghiên cứu cung cấp cái nhìn trực quan về cấu trúc dòng khí xung quanh xe buýt, đồng thời hỗ trợ định hướng cải tiến thiết kế [1].

#### **1.4.2. Những xu hướng và cải tiến gần đây trong mô phỏng khí động học ô tô**

Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và tối ưu hiệu suất tính toán trong mô phỏng khí động học ô tô, nhiều hướng tiếp cận mới đã được phát triển, tiêu biểu như sử dụng mô hình dòng rối  $k-\omega$  SST và các kỹ thuật chia lưới tiên tiến như lưới phi cấu trúc Poly-Hexcore.

Mô hình  $k-\omega$  SST được ưu tiên sử dụng trong nhiều nghiên cứu hiện đại nhờ khả năng mô phỏng hiệu quả vùng gần tường và xử lý tốt các hiện tượng tách dòng – đặc biệt quan trọng trong thiết kế khí động vỏ xe. So với mô hình  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  SST cho kết quả đáng tin cậy hơn trong các vùng biên lớp mỏng và cho phép đánh giá chính xác hơn cấu trúc dòng xoáy, lực cản và lực nâng. Một số nghiên cứu gần đây đã minh chứng hiệu quả của mô hình này trong mô phỏng dòng chảy quanh xe thể thao và xe khách có hình dạng khí động học phức tạp.

Một số nghiên cứu quốc tế tiêu biểu đã áp dụng mô hình  $k-\omega$  SST để cải thiện độ chính xác trong mô phỏng khí động học ô tô. Chẳng hạn, Ahmed et al. (2019) đã sử dụng mô hình này để mô phỏng dòng chảy xung quanh mô hình Ahmed body – một hình thể khí động học điển hình, nhằm đánh giá cấu trúc vùng xoáy đuôi xe và so sánh hiệu quả các cấu hình thiết kế đuôi khác nhau. Kết quả cho thấy mô hình  $k-\omega$  SST cho độ chính xác cao hơn so với  $k-\epsilon$  trong việc mô phỏng vị trí và hình dạng của dòng chảy tách [17].

Bên cạnh đó, cải tiến trong kỹ thuật chia lưới cũng đóng vai trò then chốt. Trong khi các dạng lưới truyền thống như tetrahedral hay hexcore từng được sử dụng phổ biến thì hiện nay, lưới Poly-Hexcore đang trở thành xu hướng nhờ khả năng kết hợp giữa tính linh hoạt của lưới phi cấu trúc và hiệu quả tính toán cao. Lưới này cho phép mô hình hóa hình học phức tạp của xe một cách chính xác hơn, đồng thời rút ngắn thời gian tính toán mà vẫn đảm bảo chất lượng kết quả.

Đáng chú ý, nghiên cứu của Phan Thành Long (2024) với đề tài “Đánh giá ảnh hưởng của các loại lưới phi cấu trúc trong quá trình mô phỏng đặc tính khí động học ô tô” [5] đã sử dụng mô hình xe DrivAer dạng Fastback để so sánh hiệu quả của các loại lưới như Poly-Hexcore, Hexcore, Polyhedral và Tetrahedral trong phần mềm CFD. Kết quả cho thấy lưới Poly-Hexcore không chỉ mang lại độ chính xác cao nhất mà còn tiết kiệm thời gian và tài nguyên tính toán đáng kể. Nghiên cứu này cũng củng cố thêm luận điểm rằng việc lựa chọn phương pháp chia lưới phù hợp là yếu tố quan trọng không kém mô hình vật lý trong mô phỏng CFD.

Nhìn chung, xu hướng hiện đại trong nghiên cứu khí động học ô tô đang hướng tới sự kết hợp giữa mô hình dòng rối tiên tiến, chia lưới tối ưu và phần mềm mô phỏng mạnh mẽ, nhằm không ngừng nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng trong thiết kế và tối ưu hóa phương tiện thực tế.

## 1.5. Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày một cách hệ thống những khái niệm, nguyên tắc cơ bản và tầm quan trọng của khí động học đối với ô tô, đặc biệt là các dòng xe SUV. Các yếu tố như lực cản, lực nâng, áp suất phân bố và các vùng xoáy hình thành quanh thân xe đã được phân tích rõ ràng, cho thấy tác động trực tiếp của chúng đến hiệu suất vận hành, mức tiêu hao nhiên liệu và tính ổn định của phương tiện. Qua đó, hình dáng vỏ xe, đặc biệt là các chi tiết như phần đầu, kính chắn gió, trần và gầm xe, được xác định là những bộ phận có ảnh hưởng lớn nhất và cần ưu tiên tối ưu hóa trong thiết kế.

Bên cạnh đó, chương này cũng đã tổng hợp các phương pháp nghiên cứu khí động học, bao gồm thực nghiệm trong hầm gió và mô phỏng lý thuyết bằng CFD. Ưu điểm của CFD trong việc phân tích chi tiết, kiểm soát điều kiện biên và tái hiện các hiện tượng khí động học phức tạp đã được nhấn mạnh, đặc biệt khi kết hợp với các mô hình dòng rối tiên tiến như  $k-\omega$  SST và kỹ thuật chia lưới Poly-Hexcore.

Tổng quan tình hình nghiên cứu cho thấy xu hướng chung trên thế giới là tập trung giảm lực cản thông qua cải thiện hình dáng, kiểm soát sự hình thành vùng xoáy và tối ưu dòng chảy. Tại Việt Nam, một số nghiên cứu đã ứng dụng thành công CFD cho các loại phương tiện khác nhau, song nghiên cứu chuyên sâu cho xe SUV vẫn còn hạn chế. Kết quả tổng quan ở chương này không chỉ xác định được khoảng trống nghiên cứu mà còn định hướng rõ ràng cho các bước tiếp theo, đặc biệt trong việc xây dựng mô hình mô phỏng và phân tích ảnh hưởng của hình dạng vỏ xe SUV đến đặc tính khí động học.

## CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ PHỎNG KHÍ ĐỘNG HỌC VỎ XE BẰNG ANSYS FLUENT

### 2.1. Cơ sở lý thuyết khí động học

#### 2.1.1. Các phương trình cơ bản

Trong mô tả và phân tích dòng chảy của không khí, các nhà nghiên cứu thường sử dụng phương trình Navier–Stokes như một công cụ cơ bản. Hệ phương trình này được xây dựng dựa trên ba định luật bảo toàn quan trọng trong cơ học chất lỏng: bảo toàn khối lượng, bảo toàn động lượng và bảo toàn năng lượng. Vì vậy, dưới dạng tổng quát, phương trình Navier–Stokes bao gồm ba phương trình cơ bản, lần lượt tương ứng với mỗi nguyên lý bảo toàn nêu trên.

Tuy nhiên, trong nghiên cứu khí động học ô tô, dòng không khí chuyển động quanh thân xe thường có vận tốc không lớn, với hệ số Mach nhỏ hơn 0,3. Đây là ngưỡng vận tốc mà người ta có thể xem dòng khí là không nén được, tức là mật độ không khí có thể coi là không thay đổi theo thời gian và không gian [18]. Với giả thiết này, phương trình Navier–Stokes có thể được đơn giản hóa: phương trình bảo toàn năng lượng có thể bỏ qua, và bài toán khí động học chỉ còn lại hai phương trình cơ bản:

- Phương trình liên tục (bảo toàn khối lượng)
- Phương trình bảo toàn động lượng.

##### 2.2.1.1. Phương trình bảo toàn khối lượng (phương trình liên tục)

Đối với một dòng khí không nén được, phương trình liên tục có thể viết dưới dạng vector như sau:

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

Phương trình liên tục biểu thị nguyên lý bảo toàn khối lượng, tức là khối lượng không được tạo ra hoặc mất đi trong suốt quá trình dòng chảy. Trong trường hợp dòng khí không nén được, mật độ của khí  $\rho$  là hằng số theo thời gian và không gian, vì vậy phương trình liên tục sẽ đảm bảo rằng lượng không khí đi qua một mặt cắt trong một khoảng thời gian nhất định là không đổi.

Khi chiếu lên tọa độ Đề các, phương trình được viết dưới dạng:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Hoặc biểu diễn dưới dạng ten sơ:

$$\partial_i u_i = 0 \quad (2.3)$$

Trong đó:  $u, v, w$  là các thành phần vận tốc trong các phương hướng  $x, y, z$ .

#### **2.2.1.2. Phương trình bảo toàn động lượng**

Phương trình bảo toàn động lượng trong khí động học mô tả sự thay đổi động lượng của không khí do các lực tác dụng lên nó. Đối với dòng khí không nén được, phương trình bảo toàn động lượng có thể viết dưới dạng vector như sau:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{u} \quad (2.4)$$

Trong đó:

- $\vec{u}$ : vận tốc không khí
- $\rho$ : khối lượng riêng của không khí
- $p$ : áp suất
- $\vec{F}$ : lực thể tích
- $\nu$ : độ nhớt động học của không khí.

Bằng cách chiếu phương trình (2.4) vào các trục của hệ tọa độ Đề các (x,y,z) chúng ta thu được ba phương trình sau:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z\end{aligned}\quad (2.5)$$

Trong đó:  $F_x$ ,  $F_y$  và  $F_z$  đại diện cho các thành phần của lực thể tích.

Nếu bỏ qua tác động của lực thể tích (do khối lượng riêng của không khí rất nhỏ), phương trình có thể được rút gọn dưới dạng ten sơ như sau:

$$\partial_t u_i + u_j \partial_j u_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i p + \nu \partial_j^2 u_i \quad (2.6)$$

Sự xuất hiện của phương trình đặc biệt này đặc trưng cho việc tính toán lực cản nhỏ. Nếu ứng suất nhớt trên một thể tích nguyên tố của chất khí là  $\tau_{ij}$ , phương trình trên có thể viết lại dưới dạng:

$$\partial_t u_i + u_j \partial_j u_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i p + \frac{1}{\rho} \partial_j \tau_{ij} \quad (2.7)$$

Như vậy, để mô tả dòng chảy không khí bao quanh vỏ xe ô tô, ta có hệ phương trình:

$$\begin{cases} \partial_i u_i = 0 \\ \partial_t u_i + u_j \partial_j u_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i p + \frac{1}{\rho} \partial_j \tau_{ij} \end{cases} \quad (2.8)$$

### 2.1.2. Mô phỏng dòng chảy rối

Có thể nhận thấy, hệ phương trình trên bao gồm bốn phương trình vi phân đạo hàm riêng với bốn ẩn số: áp suất  $p$  và ba thành phần vận tốc theo ba phương hướng  $u$ ,  $v$ ,  $w$ . Theo lý thuyết, đây là một bài toán khép kín vì số lượng phương trình tương ứng với số ẩn. Tuy nhiên, cho đến nay, một lời giải đầy đủ và tổng quát cho hệ phương trình này vẫn chưa được tìm ra.

Khó khăn chính trong việc giải quyết hệ phương trình này là sự phức tạp của các phương trình vi phân đạo hàm riêng. Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu thường sử dụng những giả thiết đơn giản hóa, tuy nhiên, điều này có thể ảnh hưởng đến độ chính xác và tính xác thực của kết quả. Mặc dù vậy, tùy theo mục đích nghiên cứu và yêu cầu về độ chính xác của bài toán, các giả thiết khác nhau có thể được chấp nhận nhằm giảm mức độ phức tạp, nhưng vẫn đảm bảo đạt được kết quả mong muốn. Hiện nay, các nhà khoa học vẫn chủ yếu sử dụng các phương pháp gần đúng để giải quyết phương trình mô tả dòng khí xung quanh vỏ xe ô tô.

Ngoài ra, dòng chảy không khí xung quanh vỏ xe ô tô thường là dòng chảy rối. Với dòng chảy rối, các thông số như áp suất và vận tốc tại một điểm trong không gian sẽ thay đổi liên tục theo thời gian. Do đó, mức độ phức tạp của bài toán phụ thuộc nhiều vào kích thước của dòng rối, thời gian tồn tại và tốc độ biến thiên của các thông số đó.

Để giải quyết những vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã phát triển nhiều phương pháp khác nhau để mô tả các thông số của dòng rối. Tùy thuộc vào cách thức mô tả dòng rối, các mô hình khác nhau được sử dụng để giải quyết bài toán khí động học ô tô. Hiện tại, hai phương pháp chủ yếu được sử dụng trong nghiên

cứu khí động học ô tô với dòng chảy rối là: giải trực tiếp phương trình Navier-Stokes và áp dụng các mô hình dòng rối.

#### ***2.1.2.1. Mô phỏng trực tiếp***

Phương pháp mô phỏng trực tiếp là phương pháp sử dụng phương trình Navier-Stokes làm cơ sở toán học để mô tả dòng chảy rối. Đây là phương pháp cung cấp mô hình chi tiết và chính xác nhất để mô tả dòng chảy khí động học của ô tô. Tuy nhiên, bài toán này có độ phức tạp rất cao. Các phép tính gặp phải nhiều khó khăn, chẳng hạn như kích thước và sự biến thiên phức tạp của dòng rối theo thời gian. Do đó, kết quả tính toán thường không ổn định và thời gian tính toán rất dài.

Vì những lý do này, phương pháp mô phỏng trực tiếp ít khi được áp dụng trong các nghiên cứu khí động học ô tô.

#### ***2.1.2.2. Các dạng mô hình mô phỏng dòng chảy rối***

Do những khó khăn trong việc mô phỏng trực tiếp, các mô hình dòng chảy rối đã trở thành lựa chọn phổ biến trong các nghiên cứu khí động học. Các mô hình này giúp giảm bớt mức độ phức tạp và thời gian tính toán, đồng thời vẫn mang lại kết quả gần đúng có độ chính xác chấp nhận được. Một số mô hình phổ biến trong việc mô phỏng dòng chảy rối là mô hình  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  và mô hình SST  $k-\omega$ .

- Mô hình  $k - \varepsilon$

Mô hình  $k - \varepsilon$  là một trong những mô hình mô phỏng dòng chảy rối phổ biến nhất và đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu khí động học. Mô hình này bao gồm hai phương trình cho động năng rối  $k$  và tỷ lệ tiêu thụ động năng rối  $\varepsilon$  giúp tính toán độ phân tán động năng rối trong dòng chảy.

Mô hình  $k - \varepsilon$  có ưu điểm là tính toán nhanh chóng và dễ dàng áp dụng vào các tình huống có dòng chảy ổn định. Tuy nhiên, mô hình này gặp khó khăn trong việc mô phỏng chính xác các dòng chảy gần bề mặt, nơi mà sự thay đổi của dòng chảy là mạnh và phức tạp, đặc biệt là trong các trường hợp có tách dòng hoặc các dòng xoáy lớn.

- Mô hình  $k - \omega$

Mô hình  $k - \omega$  sử dụng hai phương trình, một cho động năng rối  $k$  và một cho vận tốc góc rối  $\omega$ . Mô hình này được sử dụng để mô phỏng các hiện tượng rối trong các trường hợp có sự thay đổi mạnh mẽ của dòng chảy, đặc biệt là trong vùng gần bề mặt.

Mô hình  $k - \omega$  thường cho kết quả chính xác hơn trong các vùng có sự biến thiên mạnh về dòng chảy, như các bề mặt hoặc các khu vực có sự thay đổi tốc độ nhanh. Tuy nhiên, mô hình này có hạn chế trong việc áp dụng cho các dòng chảy xa bề mặt vì nó không mô tả tốt các đặc điểm của dòng chảy ở vùng đó.

- Mô hình SST  $k - \omega$

Mô hình SST  $k - \omega$  (Shear Stress Transport  $k - \omega$ ) là sự kết hợp giữa mô hình  $k - \varepsilon$  và mô hình  $k - \omega$ , với mục đích cải thiện khả năng mô phỏng dòng chảy trong các vùng gần bề mặt, nơi mà mô hình  $k - \varepsilon$  không chính xác.

Mô hình này kết hợp ưu điểm của cả hai mô hình  $k - \varepsilon$  và  $k - \omega$ . Trong vùng gần bề mặt, mô hình sử dụng phương trình  $k - \omega$  để mô phỏng chính xác hơn các hiện tượng như tách dòng và xoáy. Ở các vùng xa bề mặt, mô hình chuyển sang sử dụng phương trình  $k - \varepsilon$  để cải thiện độ chính xác khi mô phỏng các dòng chảy phát triển ổn định.

Mô hình SST  $k - \omega$  rất phù hợp với việc mô phỏng dòng chảy quanh các thân xe ô tô, nơi có sự thay đổi nhanh chóng về vận tốc và áp suất, giúp cung cấp kết quả chính xác hơn trong việc tính toán lực cản và lực nâng.

Do những ưu điểm vượt trội của mô hình SST  $k - \omega$  trong việc mô phỏng dòng chảy rối gần bề mặt và khả năng cải thiện độ chính xác trong các khu vực có sự thay đổi mạnh về vận tốc và áp suất, học viên đã lựa chọn mô hình SST  $k - \omega$  để mô phỏng dòng chảy xung quanh vỏ xe ô tô. Mô hình này giúp cung cấp kết quả chính xác hơn trong việc tính toán các lực cản, lực nâng và phân bố áp suất trên bề mặt xe, đặc biệt là ở các vùng có sự biến thiên nhanh chóng của dòng chảy.

## 2.2. Mô phỏng khí động học vỏ xe bằng phần mềm ANSYS Fluent

### 2.2.1. Hệ phương trình mô tả dòng chảy

Để mô tả dòng chảy rối bao quanh vỏ xe, phần mềm Ansys Fluent sử dụng phương trình Reynolds Navier - Stokes trung bình hóa (Reynolds Average Navier Stokes, viết tắt là RANS) [9], hệ phương trình có dạng như sau:

$$\begin{cases} \partial_i \bar{u}_i = 0 \\ \partial_t \bar{u}_i + \bar{u}_j \partial_j \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i \bar{p} + \frac{1}{\rho} \partial_j (\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \end{cases} \quad (2.9)$$

Trong các phương trình trên, các thành phần vận tốc theo ba phương  $u_i$  và áp suất chất lỏng  $p$  được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + u'_i \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (2.10)$$

Trong đó:  $\bar{u}$ ,  $\bar{p}$  là giá trị trung bình và  $u'$ ,  $p'$  là thành phần biến động của vận tốc và áp suất.

Từ các phương trình trên, ta thấy xuất hiện thêm một số thành phần như  $\overline{\rho u_i' u_j'}$ , đại diện cho ứng suất của dòng rối, đây là yếu tố quan trọng trong mô hình rối. Các phương trình này không đóng, nghĩa là cần phải bổ sung các mô hình khác để giải quyết. Thông thường, trong các bài toán tính toán, một mô hình rối như mô hình SST k- $\omega$  được sử dụng để xử lý các thành phần này, nhằm mô phỏng độ nhớt của dòng chảy trong các điều kiện biên phức tạp.

Phương trình động năng rối k và tốc độ tiêu tán riêng  $\omega$  có dạng như sau:

$$\begin{aligned}\rho \partial_t k + \rho \bar{u}_j \partial_j k &= \partial_i (\Gamma_k \partial_i k) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \\ \rho \partial_t \omega + \rho \bar{u}_j \partial_j \omega &= \partial_i (\Gamma_\omega \partial_i \omega) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega\end{aligned}\quad (2.11)$$

Trong đó:

- $\tilde{G}_k$ : thành phần động năng do gradient vận tốc gây ra. ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^3$ )
- $G_\omega$ : đại lượng đặc trưng cho sự hình thành dòng rối ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ )
- $\Gamma_k, \Gamma_\omega$ : đại lượng đặc trưng cho sự khuếch tán của k và  $\omega$
- $Y_k$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ) và  $Y_\omega$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ): đặc trưng cho sự tán xạ của k và  $\omega$  trong dòng chảy
- $D_\omega$ : đặc trưng cho sự khuếch tán chéo ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ )
- $S_k$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ),  $S_\omega$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ): các thông số dùng trong lựa chọn thư viện của phần mềm FLUENT

Các thành phần trong các phương trình 2.11 được xác định như sau:

$$\begin{aligned}\Gamma_k &= \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \\ \Gamma_\omega &= \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\end{aligned}\quad (2.12)$$

Trong đó:  $\sigma_k$  và  $\sigma_\omega$  là số Prandtl rối.

Độ nhớt dòng rối được mô tả thông qua  $k$  và  $\omega$ :

$$\mu_t = \frac{\sigma k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (2.13)$$

Trong đó:  $\alpha^*$  được xác định như trong mô hình  $k - \omega$  tiêu chuẩn,  $a_1 = 0,31$  và các thông số còn lại xác định theo [8].

Thông số  $G$  trong các phương trình 2.11 được tính như sau:

$$\begin{aligned} \tilde{G}_k &= \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \\ G_\omega &= \frac{\alpha}{\nu_t} G_k \end{aligned} \quad (2.14)$$

Các thông số trong các biểu thức trên được xác định tương tự như mô hình tiêu chuẩn.

Các thông số  $Y$  được xác định bằng các biểu thức sau:

$$\begin{aligned} Y_k &= \rho\beta^*k\omega \\ Y_\omega &= \rho\beta\omega^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Thành phần  $D_\omega$  trong phương trình 2.11 thực chất là phần tử kết nối giữa hai mô hình cơ bản, giúp tạo ra mô hình STT  $k-\omega$ , bao gồm mô hình  $k-\varepsilon$  tiêu chuẩn và mô hình  $k-\omega$ , và được diễn giải như sau:

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \partial_j k \partial_j \omega \quad (2.16)$$

Trong đó:  $F_1$  được gọi là thông số liên kết, còn  $\sigma_{\omega,2} = 1,168$ . [11]

### 2.2.2. Phương pháp xác định lực khí động từ mô phỏng CFD

Lực khí động tác dụng lên một vật thể trong dòng chảy có thể được tính toán thông qua các thành phần lực khác nhau, bao gồm lực do chênh áp và lực do ma sát. Phương pháp tính toán lực khí động có thể được mô tả bằng hai thành phần cơ bản, là lực do chênh áp và lực do ma sát, được tính toán như sau:

$$F_a = a \cdot F_p + a \cdot F_v \quad (2.17)$$

Trong đó:

- $a$  là vector chỉ phương của lực,
- $F_p$  là lực do chênh áp, (N): Đây là lực sinh ra do sự chênh lệch áp suất giữa các bề mặt của vật thể trong dòng chảy. Khi không khí (hoặc chất lỏng) chuyển động quanh vật thể, áp suất ở các vùng khác nhau thay đổi (theo nguyên lý Bernoulli và đặc tính tách dòng). Sự chênh áp này tạo ra một lực tổng hợp tác dụng lên vật, thường là thành phần chính gây ra lực cản khí động.
- $F_v$  là lực do ma sát. (N): Đây là lực sinh ra từ ma sát giữa các lớp không khí sát bề mặt vật thể và chính bề mặt đó (tác dụng của lớp biên). Do không khí có độ nhớt, lớp không khí tiếp xúc với bề mặt sẽ bị “kéo” theo chuyển động của vật, gây tiêu hao năng lượng dưới dạng ma sát. Thành phần này đặc biệt quan trọng với bề mặt nhám hoặc ở tốc độ cao.

Phương pháp tính toán này được thực hiện qua việc sử dụng các công cụ tính toán số trong phần mềm như ANSYS Fluent, nơi các thông số lực được xác định từ các ô lưới. Do đó, lực khí động được tính toán bằng tổng các lực thành phần. Cụ thể, thành phần lực do chênh áp  $F_p$  có thể được tính như sau:

$$F_p = \sum_{i=1}^n (p - p_{ref}) A_i \hat{n} \quad (2.18)$$

Trong đó:

- $p$  là áp suất tại mỗi điểm trên bề mặt, (Pa)
- $p_{ref}$  là áp suất chuẩn, (Pa)
- $A_i$  là diện tích bề mặt tại điểm  $i$ , ( $m^2$ )
- $\hat{n}$  là vectơ đơn vị vuông góc với mặt bề mặt,
- $n$  là tổng số điểm mà lực được tính toán trên đó.

Sau khi tính toán xong lực, hệ số lực khí động theo phương của lực có thể được xác định qua công thức sau:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.19)$$

Trong đó:

- $F_a$  là tổng lực khí động tính toán được, (N)
- $\rho$  là mật độ không khí ( $kg/m^3$ ),
- $V$  là vận tốc dòng chảy (m/s),
- $A$  là diện tích bề mặt ( $m^2$ ).

Hệ số lực khí động này được sử dụng để mô phỏng sự tương tác giữa vật thể và dòng chảy, đặc biệt trong các nghiên cứu khí động học như thiết kế máy bay, ô tô, tàu thủy, v.v.

Ngoài ra, ANSYS Fluent còn cung cấp khả năng tính toán các mô men và xuất kết quả dưới dạng bảng số, giúp các kỹ sư và nhà nghiên cứu có thể phân tích

và tối ưu hóa thiết kế trong môi trường số. Phần mềm cũng cung cấp các biểu đồ và phân tích đồ họa để dễ dàng hình dung kết quả tính toán, phục vụ cho việc cải tiến các sản phẩm và hệ thống khí động học.

## **2.3. Mô hình khí động học vỏ xe SUV trong Ansys Fluent**

### **2.3.1. Mô hình 3D vỏ xe SUV**

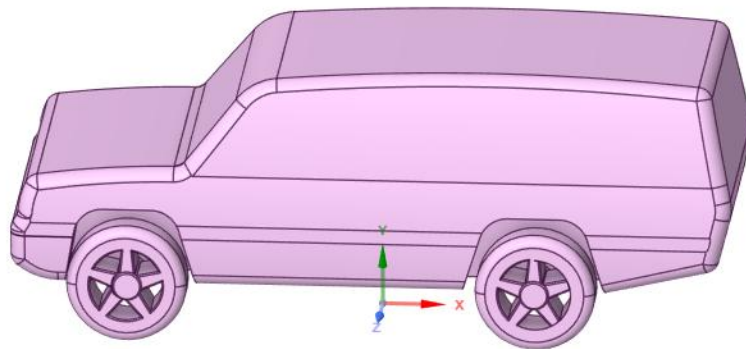
Trong phần mềm ANSYS, cả hai loại mô hình hai chiều (2D) và ba chiều (3D) đều được sử dụng để mô phỏng các hiện tượng khí động học.

Mô hình 2D có một số lợi thế nổi bật như: quá trình xây dựng hình học, tạo lưới và tính toán được thực hiện nhanh chóng, ít tiêu tốn tài nguyên hệ thống, từ đó giảm thiểu chi phí mô phỏng. Loại mô hình này phù hợp cho các phân tích sơ bộ hoặc các kết cấu hình học đơn giản, đặc biệt là khi có tính đối xứng cao. Tuy nhiên, hạn chế của mô hình 2D là khả năng mô tả chưa đầy đủ các đặc trưng vật lý và động học của dòng chảy, và chỉ phù hợp với một số trường hợp đơn giản nhất định.

Ngược lại, mô hình 3D được sử dụng phổ biến trong phần lớn các bài toán khí động học nhờ khả năng tái hiện chính xác các hiện tượng vật lý. Nó cho phép phân tích chi tiết các đặc trưng dòng chảy trong toàn bộ không gian mô phỏng và có thể áp dụng cho các hình dạng hình học bất kỳ, không bị giới hạn bởi tính đối xứng.

Tuy nhiên, nhược điểm đáng kể của mô hình 3D là dung lượng lưới lớn, dẫn đến thời gian tính toán kéo dài và yêu cầu cao về phần cứng, từ đó làm tăng chi phí thực hiện.

Dựa trên những phân tích nêu trên, để đảm bảo kết quả mô phỏng đạt độ tin cậy và chính xác cao trong bài toán khảo sát dòng khí xung quanh vỏ xe khách, em đã quyết định lựa chọn phương pháp mô hình hóa 3D. Trên cơ sở thông số kích thước của xe tham khảo, mô hình xe SUV được mô phỏng trong không gian 3 chiều thông qua sử dụng phần mềm Solid Works. Hình 3.1 minh họa mô hình 3D của vỏ xe SUV:



*Hình 2.1. Mô hình 3D xe SUV*

### **2.3.2. Xác định vùng không gian mô phỏng**

Vùng không gian mô phỏng là khu vực bao quanh vật thể khảo sát (trong trường hợp này là ô tô) được thiết lập trong quá trình mô phỏng nhằm mô tả sự tương tác giữa vật thể và môi trường chất lưu. Kích thước của vùng không gian này được lựa chọn dựa trên nguyên tắc tái hiện chính xác điều kiện hoạt động thực tế, đảm bảo độ tin cậy của kết quả mô phỏng trong khi vẫn tối ưu hóa tài nguyên tính toán như thời gian xử lý và dung lượng bộ nhớ.

Trong điều kiện thực tế, khi ô tô chuyển động trong môi trường tự nhiên, không khí bao quanh xe được xem như một miền không gian gần như vô hạn so

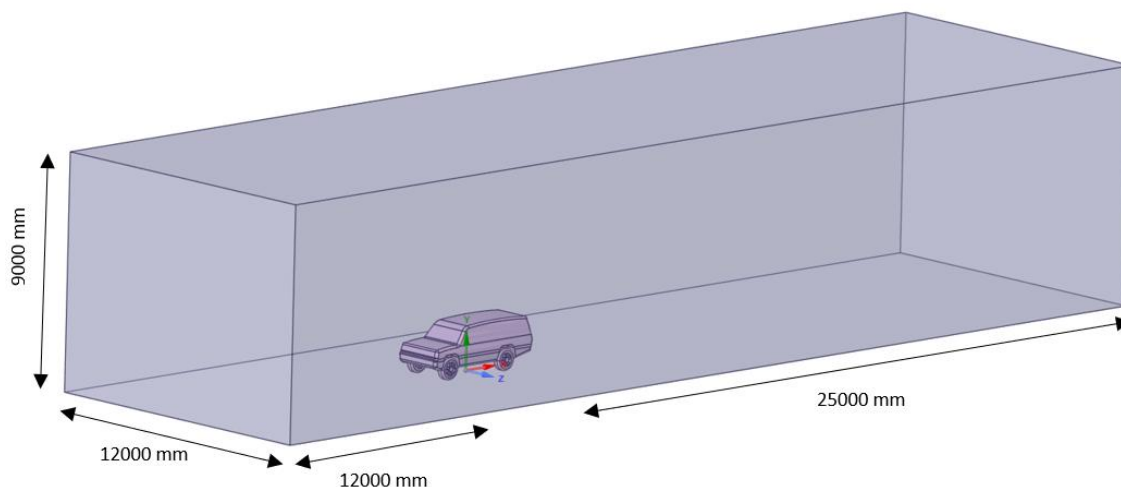
với kích thước của bản thân xe. Tuy nhiên, trong môi trường mô phỏng số, việc sử dụng một không gian vô hạn là không khả thi do hạn chế về cấu hình phần cứng và dung lượng xử lý của máy tính.

Dòng khí chuyển động quanh xe là một tổ hợp phức tạp giữa vùng chảy rối và vùng chảy tầng, phân bố không đều và chịu ảnh hưởng mạnh bởi hình dạng hình học cũng như tốc độ của xe. Tuy nhiên, ở khoảng cách đủ xa so với bề mặt xe, ảnh hưởng của hình thể xe lên dòng chảy giảm dần và dòng khí có xu hướng trở lại trạng thái ổn định hơn – lúc này có thể coi là dòng chảy tầng không bị tác động bởi chuyển động hay hình dáng của xe. Đây chính là cơ sở để xác định ranh giới của vùng tính toán.

Do vậy, các mặt giới hạn của vùng không gian mô phỏng thường được đặt tại các vị trí mà dòng khí đã hồi phục trạng thái ổn định, không còn bị ảnh hưởng đáng kể bởi đối tượng mô phỏng. Điều này vừa giúp đảm bảo tính chính xác cho mô phỏng, vừa tiết kiệm tài nguyên phần cứng. Ngược lại, nếu thiết lập một miền không gian quá lớn sẽ làm tăng đáng kể số lượng phần tử khi chia lưới, kéo theo thời gian xử lý lâu hơn và tiêu tốn nhiều tài nguyên máy tính hơn, trong khi hiệu quả cải thiện độ chính xác có thể không tương xứng.

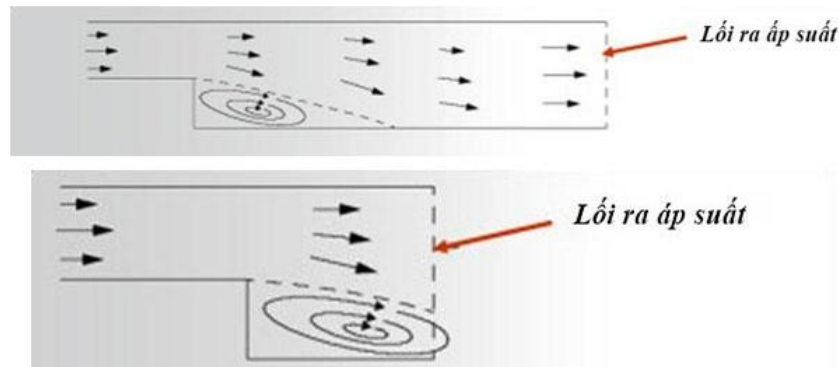
Trên thực tế, việc xác định kích thước tối ưu cho vùng không gian mô phỏng là một thách thức, đặc biệt là đối với các bài toán có hình học phức tạp như ô tô. Tuy nhiên, dựa trên kinh nghiệm thực tế và các khuyến nghị từ tài liệu hướng dẫn sử dụng phần mềm ANSYS Fluent [7] kết hợp với các nghiên cứu [2,3,21], vùng mô phỏng xung quanh vỏ xe SUV ban đầu được thiết lập dưới dạng một hình hộp chữ nhật với các kích thước tối thiểu được tính toán sao cho đáp ứng đồng thời cả

yêu cầu kỹ thuật và hiệu quả mô phỏng. Miền tính toán với các thông số lựa chọn được mô tả như sau:



*Hình 2.2. Vùng không gian mô phỏng*

Để xác định một không gian mô phỏng phù hợp trong phân tích khí động học bằng phần mềm ANSYS Fluent, cần phải dựa vào quan sát các kết quả mô phỏng sơ bộ – đặc biệt là trường vận tốc – để đánh giá hành vi dòng chảy xung quanh vật thể. Việc quan sát sự phân bố và tính chất của dòng khí giúp xác định khu vực nào dòng đã ổn định, khu vực nào xuất hiện hiện tượng xoáy hoặc rối. Từ đó, có thể điều chỉnh, thu hẹp hoặc mở rộng không gian mô phỏng sao cho vừa đảm bảo độ chính xác vừa tránh lãng phí tài nguyên.



*Hình 2.3. Ví dụ về một số dạng dòng chảy ngược*

Một trong những tiêu chí quan trọng để đánh giá mức độ hợp lý của miền không gian mô phỏng là sự ổn định và hướng chuyển động của dòng chảy tại các biên. ANSYS Fluent khuyến cáo rằng, trong quá trình giải bài toán, tại các biên đầu vào (inlet) và đầu ra (outlet) không được xuất hiện hiện tượng dòng chảy ngược (backflow) – tức là:

- Tại biên vào (inlet), dòng khí không được bị cuốn ngược trở ra khỏi không gian mô phỏng.
- Tại biên ra (outlet), dòng khí không được quay ngược lại vào bên trong không gian mô phỏng.

Trong quá trình mô phỏng, nếu xảy ra hiện tượng dòng chảy ngược (backflow) tại các biên đầu vào hoặc đầu ra, phần mềm ANSYS Fluent sẽ tự động phát hiện và đưa ra cảnh báo cho người sử dụng. Hiện tượng này không chỉ ảnh hưởng đến độ ổn định của mô hình mà còn làm sai lệch kết quả tính toán, đặc biệt là trong các khu vực gần biên nơi dòng chảy không còn tuân theo quy luật vật lý mong muốn.

Khi nhận được cảnh báo từ phần mềm, người thiết lập mô hình bắt buộc phải xem xét lại cấu trúc và kích thước của không gian mô phỏng. Việc hiệu chỉnh có thể bao gồm mở rộng các mặt biên ra xa hơn khỏi vật thể để đảm bảo dòng khí kịp trở về trạng thái ổn định trước khi tiếp xúc với biên mô phỏng. Ngoài ra, cũng cần phân tích lại cấu hình dòng chảy và đặc điểm hình học của vật thể để đảm bảo biên được đặt tại vị trí hợp lý, không nằm trong vùng có dòng rối hoặc xoáy mạnh.

Việc điều chỉnh lại không gian mô phỏng trong các trường hợp này là cần thiết để đảm bảo tính đúng đắn của mô hình và nâng cao độ tin cậy của kết quả mô phỏng khí động học.

### **2.3.3. Chia lưới và đặt các điều kiện biên**

Quá trình tạo lưới trong mô phỏng khí động học là bước chuyển đổi không gian tính toán liên tục thành các phần tử rời rạc, nhằm phục vụ cho việc giải bài toán bằng phương pháp số. Trong ANSYS Fluent, phương pháp được sử dụng là phương pháp thể tích hữu hạn (Finite Volume Method). Việc thiết kế lưới – bao gồm kiểu lưới, mật độ, kích thước phần tử và tổng số phần tử – cần được lựa chọn phù hợp với nhiều yếu tố như bản chất vật lý của bài toán, yêu cầu về độ chính xác, khả năng tính toán của hệ thống phần cứng và thời gian cho phép để hoàn thành mô phỏng.

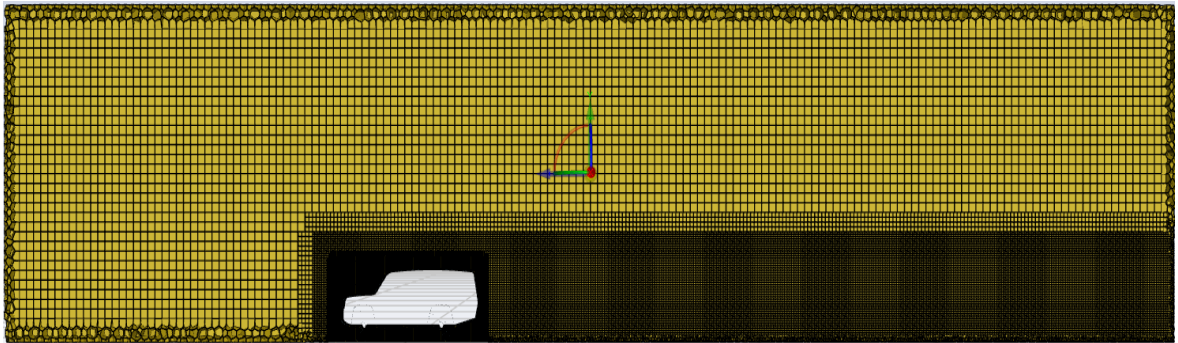
Mức độ chính xác của kết quả mô phỏng chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi chất lượng và cấu trúc của lưới. Các yếu tố như độ mịn, tỉ lệ phát triển lưới, và loại phần tử phải được cân nhắc cẩn thận. Lưới càng mịn, phần tử càng nhỏ thì khả năng mô phỏng chi tiết các hiện tượng dòng chảy càng cao, tuy nhiên điều đó cũng đồng nghĩa với việc gia tăng số lượng phần tử, kéo theo nhu cầu về bộ nhớ máy

tính và thời gian xử lý tăng đáng kể. Do đó, việc tối ưu hóa lưới là cần thiết để cân bằng giữa độ chính xác và hiệu quả tính toán.

Một chiến lược phổ biến và hiệu quả trong chia lưới là chia lưới không đồng đều theo từng vùng, tùy theo mức độ ảnh hưởng của chúng đến kết quả mô phỏng. Cụ thể:

- Khu vực 1: Là vùng gần bề mặt vỏ xe – nơi có gradient vận tốc và áp suất lớn, thường xuất hiện lớp biên và vùng tách dòng. Do đó, vùng này cần lưới rất mịn để mô phỏng chính xác tương tác giữa chất lưu và bề mặt vật thể.
- Khu vực 2: Là vùng trung gian giữa vỏ xe và phần không gian xa hơn, nơi dòng chảy bắt đầu chuyển sang trạng thái ổn định hơn. Lưới tại đây được chia với mật độ trung bình – đủ chi tiết để duy trì độ chính xác, nhưng không quá dày để tránh lãng phí tài nguyên.
- Khu vực 3: Là phần còn lại của không gian mô phỏng, nằm xa xe và ít chịu ảnh hưởng trực tiếp từ hình học hoặc chuyển động của dòng khí. Vùng này có thể sử dụng lưới thưa hơn hoặc lưới thô nhằm giảm thiểu tổng số phần tử mà vẫn đảm bảo chất lượng tổng thể của mô hình.

Sự phân chia không gian chia lưới thành các vùng có mức độ chi tiết khác nhau không chỉ giúp nâng cao độ chính xác tại các khu vực quan trọng, mà còn giúp giảm thiểu thời gian tính toán và tối ưu hiệu quả sử dụng tài nguyên máy tính.



Hình 2.4. Chia lưới mô hình trong Ansys Fluent

Trong quá trình mô phỏng động lực học chất lưu (CFD) để phân tích khí động học của các dòng chảy, việc lựa chọn loại lưới là yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và hiệu quả tính toán của mô hình. Các loại lưới khác nhau mang lại đặc điểm riêng về cấu trúc, khả năng thích ứng với hình học phức tạp, cũng như tốc độ hội tụ và độ chính xác của kết quả mô phỏng. Một số loại lưới được sử dụng phổ biến hiện nay:



Hình 2.5. Các dạng phân tử lưới trong mô hình mô phỏng 3D

Theo tài liệu nghiên cứu [20], tác giả Phan Thành Long đã nghiên cứu ba loại lưới khác nhau được sử dụng phổ biến hiện nay gồm:

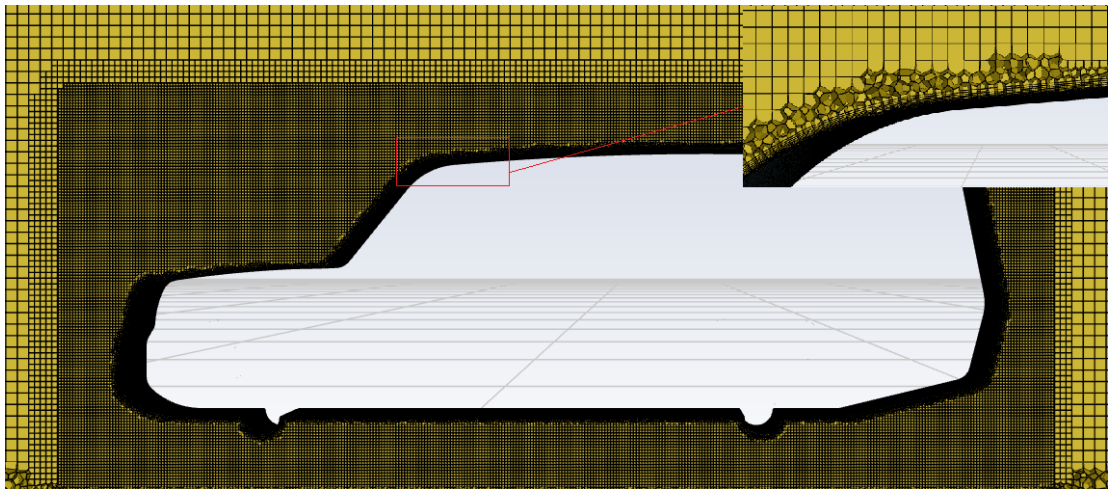
- Lưới tứ diện Tetrahedral:
  - Các phần tử là hình tứ diện (4 mặt tam giác).
  - Phù hợp với hình học phức tạp nhưng có thể không ổn định bằng các loại lưới khác.
  - Thường được sử dụng khi cần tạo lưới tự động cho hình dạng cong, không đều.
- Lưới hexahedral đa lớp
  - Dạng lưới hình hộp chữ nhật (hexa), đặc biệt có các lớp đều nhau gần biên vật thể.
  - Loại lưới này rất tốt cho mô phỏng lớp biên (boundary layer) và dòng chảy song song.
  - Được sử dụng phổ biến trong mô phỏng dòng chảy ổn định.
- Lưới Poly – Hexcore
  - Kết hợp: phần tử đa diện (polyhedral) gần bề mặt và lõi là hexahedral đều.
  - Tối ưu giữa độ chính xác và tốc độ tính toán.

Sau quá trình kiểm tra và so sánh, lưới Poly-Hexcore được lựa chọn là phương án tối ưu nhờ các ưu điểm vượt trội như sau:

- Cấu trúc tổ hợp thông minh: Lưới Poly-Hexcore kết hợp giữa các phần tử đa diện (polyhedral) ở vùng biên và phần tử hexa ở vùng lõi dòng chảy, giúp cân bằng tốt giữa độ chính xác và tốc độ tính toán.
- Độ ổn định và tính hiệu quả: So với lưới tứ diện truyền thống, lưới Poly-Hexcore có khả năng hội tụ tốt hơn và giảm số lượng phần tử cần thiết trong vùng lõi, từ đó giảm chi phí tính toán đáng kể.

– Khả năng mô phỏng tốt vùng rỗng và biên: Với vùng lớp biên được chia mịn và lớp đệm polyhedral chuyển tiếp mượt mà vào vùng lõi hexa, lưới Poly-Hexcore phù hợp để mô phỏng các dòng chảy có đặc điểm rối phức tạp, đặc biệt quanh các vật thể khí động học như tàu bay hoặc thiết bị bay không người lái.

Với những ưu điểm của các loại lưới như đã phân tích trên đây, học viên lựa chọn dạng lưới Poly – Hexcore để thực hiện chia lưới cho mô hình vỏ xe SUV. Phương pháp này sử dụng các phần tử lục diện trong phần lớn miền tính toán, và các phần tử lăng trụ tại vùng lớp biên. Để tăng chất lượng lưới, các phần đa diện nhiều mặt được sử dụng tại vùng chuyển tiếp giữa hai loại lưới trên, do đó giảm được đáng kể số lượng phần tử lưới. Kết quả hình ảnh chia lưới được trình bày tại hình 3.:



*Hình 2.6. Chia lưới kiểu Poly – Hexcore*

Để đánh giá chất lượng lưới cũng như đảm bảo yêu cầu hội tụ của bài toán mô phỏng, phần mềm Ansys Fluent quan tâm nhiều tới chỉ số Orthogonal quality – chỉ số chất lượng trực giao. Đây là một tiêu chí xác định độ tốt của phần tử lưới

dựa trên góc giữa các vector pháp tuyến tại các mặt và hướng kết nối giữa các điểm nút.

Theo khuyến cáo của phần mềm Ansys Fluent, chỉ số Min Orthogonal quality > 0,09 đảm bảo lưới có chất lượng tốt, mô phỏng ổn định. Kết quả chia lưới được trình bày tại bảng 2:

**Bảng 2.1:** Kết quả chia lưới tính toán

| Thông số                   | Giá trị      |
|----------------------------|--------------|
| Kiểu lưới                  | Poly-Hexcore |
| Số lượng phần tử           | 6421122      |
| Minimum Orthogonal Quality | 0.1          |
| Maximum Aspect Ratio       | 163.03       |

Sau khi đã có được mô hình chưa lưới, học viên tiến hành đặt các điều kiện biên cho mô hình như sau:

- Thuộc tính của không khí: khối lượng riêng của không khí là 1,225 kg/m<sup>3</sup>, độ nhớt động học là  $1,7894.10^{-5}$  (kg.m/s<sup>-1</sup>);
- Vận tốc dòng khí tại đầu vào (tại vị trí mặt cắt ngang của vùng không gian mô phỏng mà tại đó Ansys-Fluent bắt đầu thực hiện việc tính toán mô phỏng). Trong bài báo này tác giả lựa chọn đầu vào 30 m/s.
- Áp suất không khí tại đầu ra của vùng không gian mô phỏng. Khi dòng khí tại đầu ra của vùng không gian mô phỏng chuyển động ổn định (không còn ảnh hưởng của hiện tượng xoáy của dòng khí) thì áp suất tại đó có thể xác định bằng áp suất khí quyển (áp suất của môi trường xung quanh);

- Thuộc tính của bề mặt mô hình vỏ xe: lựa chọn thuộc tính “wall - no slip” nghĩa là dạng “tường - không trượt”, đảm bảo tính chất của bề mặt vỏ xe phù hợp với giả thiết không biến dạng và có ma sát nhớt giữa dòng khí và bề mặt vỏ xe.

## 2.4. Kết luận chương 2

Chương 2 đã làm rõ nền tảng lý thuyết cho việc mô phỏng khí động học vỏ xe bằng phần mềm ANSYS Fluent, từ các phương trình cơ bản (bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng) cho đến việc lựa chọn mô hình dòng rối và kỹ thuật tính toán phù hợp. Mô hình RANS với biến thể  $k-\omega$  SST được lựa chọn vì khả năng dự đoán tốt hiện tượng tách dòng, xử lý chính xác vùng lớp biên và mang lại độ tin cậy cao trong các bài toán khí động học vỏ xe.

Ngoài việc trình bày cơ sở toán học, chương này cũng mô tả chi tiết quy trình thiết lập bài toán trên ANSYS Fluent, bao gồm xác định miền tính toán, đặt điều kiện biên, lựa chọn dạng lưới và đảm bảo chất lượng lưới thông qua các chỉ số như Orthogonal Quality và Aspect Ratio. Kỹ thuật chia lưới Poly-Hexcore được áp dụng nhằm kết hợp ưu điểm của lưới cấu trúc và phi cấu trúc, giúp giảm thời gian tính toán nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác.

Mô hình 3D của xe SUV Toyota Land Cruiser được xây dựng ở dạng “vỏ trơn”, loại bỏ các chi tiết nhỏ để tập trung vào ảnh hưởng của hình dáng tổng thể. Các thông số đầu vào được lựa chọn phù hợp với điều kiện vận hành thực tế, đảm bảo tính khả thi và giá trị ứng dụng của kết quả mô phỏng. Chương 2 vì thế đã tạo ra nền tảng kỹ thuật và mô hình hóa vững chắc, là bước chuẩn bị quan trọng cho việc phân tích chi tiết kết quả mô phỏng ở chương 3.

## **CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG KHÍ ĐỘNG HỌC VỎ XE SUV BẰNG PHẦN MỀM ANSYS FLUENT**

### **3.1. Giới thiệu về Ansys Fluent**

ANSYS Fluent là phần mềm mô phỏng động lực học chất lỏng (CFD) mạnh mẽ, được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu và thiết kế khí động học, truyền nhiệt, dòng chảy chất lỏng và khí, các phản ứng hóa học, và nhiều ứng dụng kỹ thuật khác. Fluent cung cấp một loạt các công cụ mô phỏng dòng chảy chất lỏng và khí, cho phép người dùng mô phỏng các hiện tượng phức tạp như dòng chảy rối, dòng chảy siêu âm, truyền nhiệt, và các hệ thống phản ứng hóa học.

Phần mềm sử dụng các phương pháp số để giải quyết các phương trình điều khiển dòng chảy, chủ yếu là phương trình Navier-Stokes, kết hợp với các mô hình turbulence (rối) để mô phỏng dòng chảy không ổn định. ANSYS Fluent đặc biệt mạnh mẽ trong việc mô phỏng các ứng dụng khí động học, từ dòng chảy qua các vật thể nhỏ như ống dẫn đến mô phỏng dòng chảy quanh các xe cộ và máy bay.

Phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) là phương pháp chính mà ANSYS Fluent sử dụng để giải các bài toán khí động học. Trong phương pháp này, không gian tính toán được chia thành các lưới nhỏ, và bài toán sẽ được giải tại mỗi điểm trong lưới đó. Phương pháp này giúp làm việc hiệu quả với các vấn đề có biên dạng phức tạp và không gian ba chiều. Trình tự thực hiện trong ANSYS Fluent:

- **Chuẩn bị mô hình và lưới (Meshing):**
  - Trước tiên, người dùng cần tạo ra mô hình vật thể (ví dụ như xe ô tô, máy bay, hoặc ống dẫn) trong phần mềm CAD hoặc sử dụng các công cụ tạo lưới trong

ANSYS Fluent. Lưới chia không gian tính toán thành các tế bào nhỏ (control volumes), nơi các phương trình sẽ được giải.

- Lưới có thể là dạng cấu trúc (structured) hoặc phi cấu trúc (unstructured), tùy thuộc vào độ phức tạp của hình dạng và yêu cầu tính toán.

- **Thiết lập điều kiện biên (Boundary conditions):**

- Điều kiện biên bao gồm các thông số như vận tốc dòng chảy, áp suất, và các thông số chất lỏng tại các bề mặt tiếp xúc của mô hình với môi trường xung quanh.

- Các điều kiện biên này rất quan trọng để đảm bảo tính chính xác của mô phỏng và có thể thay đổi tùy thuộc vào bài toán cụ thể.

- **Chọn mô hình vật lý và các mô hình rối:**

- Chọn mô hình vật lý phù hợp, chẳng hạn như mô hình dòng chảy nén (incompressible) hoặc dòng chảy không nén (compressible), và các mô hình rối như  $k-\epsilon$  hoặc  $k-\omega$  để mô phỏng tính chất của dòng chảy rối.

- Mô hình rối giúp mô phỏng các dao động và biến động của dòng chảy mà không thể mô phỏng trực tiếp trong một mô hình lý tưởng.

- **Thiết lập phương pháp giải (Solver setup):**

- ANSYS Fluent cung cấp các phương pháp giải số khác nhau, bao gồm phương pháp giải tiên tiến cho dòng chảy ổn định và không ổn định.

- Chọn các thuật toán giải số (iteration schemes) phù hợp và các điều kiện hội tụ để đảm bảo quá trình tính toán sẽ đi đến kết quả ổn định.

- **Giải bài toán (Solving):**

- Sau khi tất cả các thông số đã được thiết lập, người dùng tiến hành giải bài toán. ANSYS Fluent sẽ sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn để giải các phương

trình điều khiển dòng chảy, như phương trình Navier-Stokes, và tính toán các đại lượng khí động học như áp suất, vận tốc và lực cản.

- **Xử lý kết quả (Post-processing):**

- Sau khi giải xong bài toán, ANSYS Fluent cung cấp các công cụ xử lý kết quả để phân tích và trực quan hóa các dữ liệu mô phỏng. Người dùng có thể xem phân bố áp suất, vận tốc, các lực tác động, và các đặc tính khí động học khác dưới dạng đồ họa, biểu đồ hoặc bảng số liệu.

- Việc phân tích này giúp rút ra các thông tin quan trọng cho việc tối ưu hóa thiết kế, ví dụ như giảm lực cản, nâng cao hiệu quả khí động học hoặc cải thiện ổn định của phương tiện.

### **3.2. Thông số xe và các giả thiết của bài toán mô phỏng**

#### **3.2.1. Lựa chọn thông số xe Toyota Land Cruiser**

Thông số kích thước bao của vỏ xe SUV được lấy theo mẫu xe Toyota Land Cruiser. Các thông số kích thước cơ bản được thể hiện như sau:

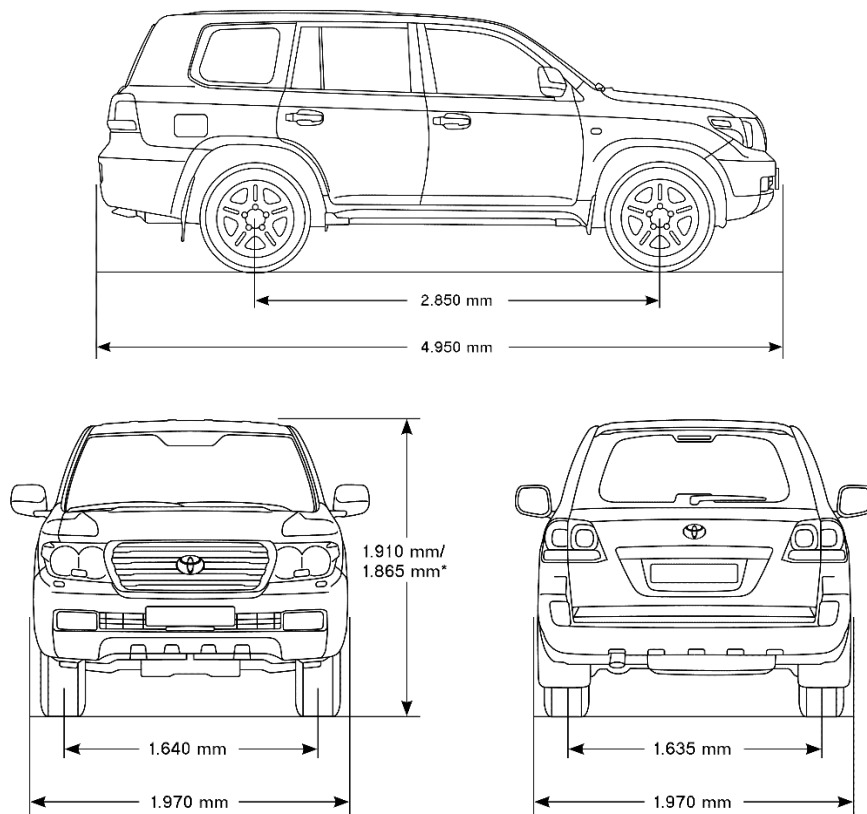
**Bảng 3.1:** Kích thước cơ bản của xe mô phỏng

| Thông số            | Ký hiệu | Kích thước (mm) |
|---------------------|---------|-----------------|
| Chiều dài tổng thể  | L       | 4950            |
| Chiều rộng tổng thể | W       | 1970            |
| Chiều cao tổng thể  | H       | 1910            |

Ngoài các thông số trên, để thực hiện mô phỏng khí động học chính xác, một số thông số bổ sung về chiều dài cơ sở, khoảng cách giữa các trục và các đặc tính khí động học khác của xe cũng rất quan trọng. Ví dụ, chiều dài cơ sở của xe, khoảng cách giữa trục trước và trục sau, và các đặc điểm về góc nghiêng của bề mặt đều ảnh hưởng trực tiếp đến phân tích lực khí động và tính toán lực cản.

Các thông số này sẽ được sử dụng trong mô hình khí động học để đánh giá sự tương tác giữa dòng chảy và vỏ xe. Cùng với đó, hình dạng của xe (như các yếu tố cong, thẳng hoặc các đặc điểm thiết kế khác) sẽ đóng vai trò quyết định trong việc giảm thiểu lực cản không cần thiết và tối ưu hóa hiệu suất khí động học.

Dưới đây là bản vẽ chi tiết về các kích thước của xe Toyota Land Cruiser:



*Hình 3.1. Kích thước cơ bản xe Toyota Land Cruiser*

### **3.2.2. Các giả thiết và giới hạn nghiên cứu của bài toán mô phỏng**

Để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy trong quá trình mô phỏng khí động học của xe, đồng thời phù hợp với khả năng tính toán của máy tính, luận án đã đưa

ra một số giả thiết cơ bản, giúp giảm thiểu độ phức tạp của bài toán mà vẫn giữ được sự tương thích với thực tế. Cụ thể, các giả thiết được sử dụng như sau:

- Mô hình vỏ xe là hoàn toàn cứng: Trong quá trình mô phỏng, giả thiết vỏ xe không bị biến dạng dưới tác động của lực khí động học được áp dụng. Điều này có nghĩa là vỏ xe được coi như một vật thể cứng, không có sự biến dạng hoặc thay đổi hình dạng trong suốt quá trình mô phỏng, giúp đơn giản hóa mô hình tính toán và giảm thiểu yêu cầu về tài nguyên tính toán.

- Bỏ qua quá trình trao đổi nhiệt: Trong mô phỏng này, quá trình trao đổi nhiệt giữa vỏ xe và không khí bị bỏ qua. Tức là, chúng ta không xem xét sự trao đổi nhiệt, sự thay đổi nhiệt độ giữa không khí và các bề mặt của xe, mặc dù trong thực tế, hiện tượng này có thể ảnh hưởng đến một số tính toán khí động học. Tuy nhiên, do mục tiêu nghiên cứu chủ yếu tập trung vào lực khí động học, việc bỏ qua yếu tố nhiệt sẽ làm giảm độ phức tạp của mô phỏng mà vẫn đảm bảo tính chính xác của các kết quả chính.

- Bề mặt vỏ xe là nhẵn và gầm xe được bọc phẳng: Giả thiết này đơn giản hóa các tính toán bằng cách coi bề mặt vỏ xe là hoàn toàn phẳng và không có các đặc điểm gồ ghề, nhám hay các yếu tố khác như gương chiếu hậu, gạt mưa, các gân, gờ, khe rãnh, hốc bánh xe, ăng-ten, tay nắm cửa, v.v. Điều này giúp làm giảm độ phức tạp trong mô phỏng mà không ảnh hưởng đáng kể đến các kết quả về lực cản khí động học chính của xe.

- Vận tốc dòng khí tại đầu vào của mô phỏng: Mô phỏng giả định rằng dòng khí có vận tốc không đổi và hướng của dòng khí luôn song song với trục dọc của xe, thổi từ đầu xe ra đuôi xe. Điều này có nghĩa là không có sự thay đổi về vận tốc dòng khí trong quá trình mô phỏng, giúp giảm bớt các yếu tố biến động trong môi trường tính toán và làm cho các tính toán trở nên ổn định hơn.

– Vận tốc không khí tại các bề mặt vỏ xe và biên của không gian mô phỏng: Vận tốc của không khí tại các bề mặt của xe (cả vỏ xe và bề mặt giới hạn của vùng không gian mô phỏng) được giả thiết là bằng 0 m/s. Điều này giả định rằng không khí không di chuyển ngay tại các bề mặt này, tạo điều kiện thuận lợi để tính toán sự phân bố áp suất và lực cản khí động học trên bề mặt xe.

Những giả thiết này được đưa ra nhằm mục đích giảm bớt sự phức tạp trong quá trình mô phỏng khí động học, đồng thời vẫn đảm bảo rằng các kết quả nhận được có tính khả thi và phù hợp với thực tế. Mặc dù một số yếu tố đã được bỏ qua, nhưng những giả thiết này giúp đạt được kết quả chính xác và đáng tin cậy trong khuôn khổ khả năng tính toán của máy tính.

### **3.3. Đặt các điều kiện tính toán và thiết lập thuật giải**

Trong quá trình thiết lập bài toán mô phỏng khí động học bằng mô hình SST k- $\omega$ , tác giả đã tiến hành gán các thông số cần thiết để đảm bảo mô hình hoạt động hiệu quả và phản ánh đúng điều kiện thực tế. Các thiết lập cụ thể như sau:

- Lựa chọn hệ đơn vị sử dụng trong mô phỏng: Các đại lượng vật lý được thiết lập theo hệ đơn vị phù hợp với tiêu chuẩn mô phỏng trong Fluent:
  - Kích thước hình học: mm
  - Vận tốc dòng khí: m/s
  - Áp suất: N/m<sup>2</sup> (Pa)
  - Lực tác dụng: N (Newton)
- Xác định bề mặt bắt đầu mô phỏng: Trong không gian mô phỏng, mặt phía trước (inlet) được chọn làm vùng khởi đầu, tại đó các điều kiện biên về dòng khí được thiết lập cố định. Dòng không khí được coi như đi vào không gian mô phỏng từ bề mặt này với vận tốc và hướng xác định trước. Việc chọn mặt trước làm đầu

vào giúp ổn định điều kiện ban đầu, đồng thời thuận lợi cho quá trình nội suy và lan truyền giá trị các trường vật lý sang các vùng lân cận trong mô hình. Vận tốc đặt tại đây tương đương với vận tốc không khí tự do  $V_{\infty}$ .

- Thiết lập vận tốc dòng khí tại đầu vào: Giá trị vận tốc được chọn là 30 m/s (tương đương 108 km/h), phản ánh điều kiện hoạt động thực tế của xe ô tô khi di chuyển trên các tuyến đường cao tốc tại Việt Nam. Vận tốc này cũng đảm bảo tạo ra tác động rõ rệt của lực cản khí động, giúp mô phỏng đầy đủ các đặc tính dòng chảy và tương tác với kết cấu xe.

- Dạng biểu diễn kết quả mô phỏng:

- Dạng đồ họa: Các kết quả được thể hiện thông qua bản đồ phân bố vận tốc, áp suất, đường dòng quanh thân xe; biểu đồ hệ số áp suất ( $C_p$ ) dọc thân xe; và biểu đồ vận tốc dòng khí trong lớp biên gần bề mặt vỏ xe.

- Dạng số liệu bảng: Mô phỏng cung cấp các kết quả định lượng bao gồm lực và mô men tác dụng lên thân xe theo ba phương x, y, z, cũng như hệ số cản khí động  $C_d$ . Trong hệ tọa độ của mô hình:

- + Trục x song song với chiều dài xe (hướng chuyển động),
- + Trục y thẳng đứng, vuông góc mặt đường,
- + Trục z vuông góc với mặt phẳng tạo bởi hai trục x và y.

Trong phần mềm ANSYS Fluent, có hai loại bộ giải chính để xử lý các bài toán dòng chảy: pressure-based solver và density-based solver. Việc lựa chọn bộ giải phù hợp phụ thuộc vào đặc điểm của dòng chảy, đặc biệt là giá trị số Mach (tốc độ dòng chảy so với tốc độ âm thanh).

- Bộ giải dạng density-based được sử dụng hiệu quả trong các bài toán có dòng chảy nén mạnh, điển hình là khi số Mach  $> 3$ . Loại solver này phù hợp với các trường hợp dòng chảy siêu thanh hoặc có sóng xung kích.
- Bộ giải dạng pressure-based thích hợp với các bài toán có số Mach  $< 3$ , tức là dòng chảy dưới âm hoặc cận âm. Đây là trường hợp thường gặp trong các mô phỏng khí động học của ô tô, nơi vận tốc dòng khí không vượt quá tốc độ âm thanh.

Do đó, trong nghiên cứu này, với điều kiện dòng chảy dưới âm (vận tốc 30 m/s, tương ứng với Mach  $\approx 0.09$  ở điều kiện khí quyển tiêu chuẩn), bộ giải dạng pressure-based đã được lựa chọn để thực hiện mô phỏng. Chi tiết các lựa chọn thiết lập trong quá trình mô phỏng được trình bày trong Bảng 3:

**Bảng 3.2:** Thiết lập thuật giải

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| Simulation                   | 3D                       |
| Processing Option            | Serial                   |
| Pressure – Velocity Coupling |                          |
| Scheme                       | Coupled                  |
| Solver                       |                          |
| Gradient                     | Least Squares Cell Based |
| Pressure                     | Second Order             |
| Momentum                     | Second Order Upwind      |
| Turbulent Kinetic Energy     | Second Order Upwind      |
| Turbulent Dissipation Rate   | Second Order Upwind      |
| Iteration                    | 600                      |

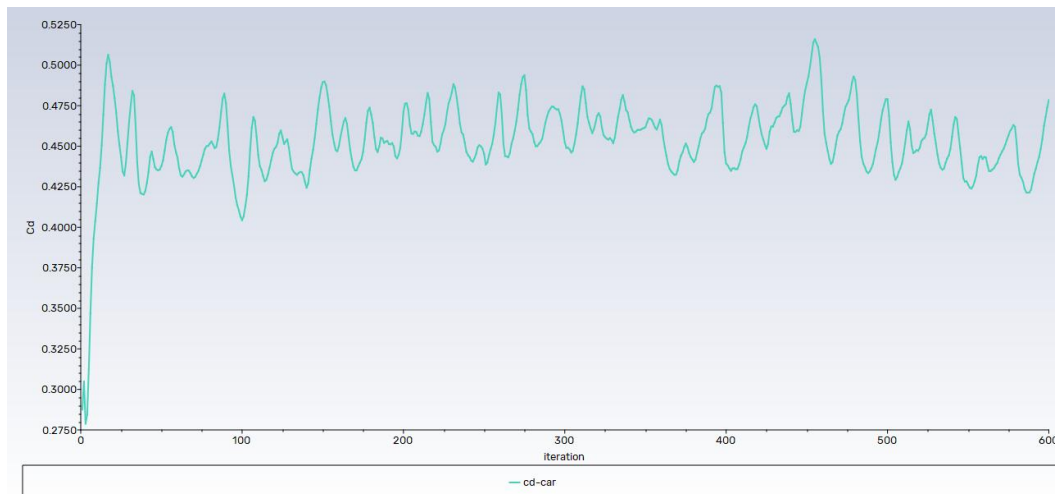
### 3.4. Phân tích kết quả mô phỏng

#### 3.4.1. Kết quả hệ số cản $C_d$ và hệ số nâng $C_l$

Sau khi tiến hành mô phỏng dòng khí chuyển động bao quanh vỏ xe SUV bằng phần mềm CFD, hai thông số khí động học quan trọng đã được xác định là hệ số cản ( $C_d$ ) và hệ số nâng ( $C_l$ ).

- Hệ số cản  $C_d$ :

Hệ số cản khí động học được ghi nhận dao động quanh giá trị trung bình là  $C_d = 0,478$  sau khoảng 600 bước lặp. Biểu đồ trong Hình 3.2 cho thấy giá trị  $C_d$  bắt đầu từ mức thấp ( $\sim 0,28$ ), sau đó tăng nhanh và dao động trong khoảng từ 0,42 đến 0,50. Sau giai đoạn đầu dao động mạnh, đường cong dần ổn định về một biên độ dao động nhỏ hơn.



Hình 3.2. Kết quả hệ số cản  $C_d$

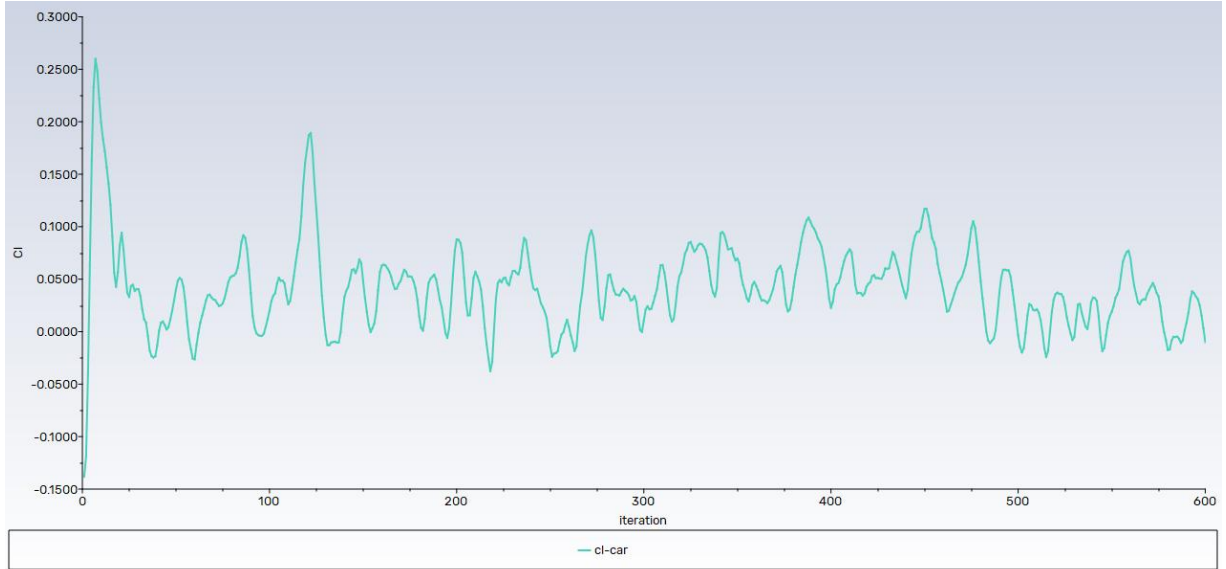
Trong biểu đồ này:

- Trục tung : Giá trị  $C_d$  – đây là hệ số cản khí động. Nó biểu thị mức độ lực cản của không khí tác động lên xe khi chuyển động. Giá trị  $C_d$  càng nhỏ thì xe càng khí động học hơn, lực cản ít hơn.
- Trục hoành: (Iteration – số vòng lặp) trong quá trình tính toán mô phỏng CFD. Mỗi vòng là một bước giải số của phần mềm để dần hội tụ đến kết quả ổn định. Như thiết lập thuật giải từ ban đầu gồm 600 vòng lặp.

Đánh giá: Giá trị  $C_d = 0,478$  là một con số phù hợp đối với xe SUV, vốn có hình dạng thân xe lớn và diện tích cản gió lớn hơn so với sedan hoặc coupe. Mức cản này phản ánh đúng đặc tính hình học của xe và phù hợp với các giá trị được công bố trong các nghiên cứu tương tự.

- Hệ số nâng  $C_l$

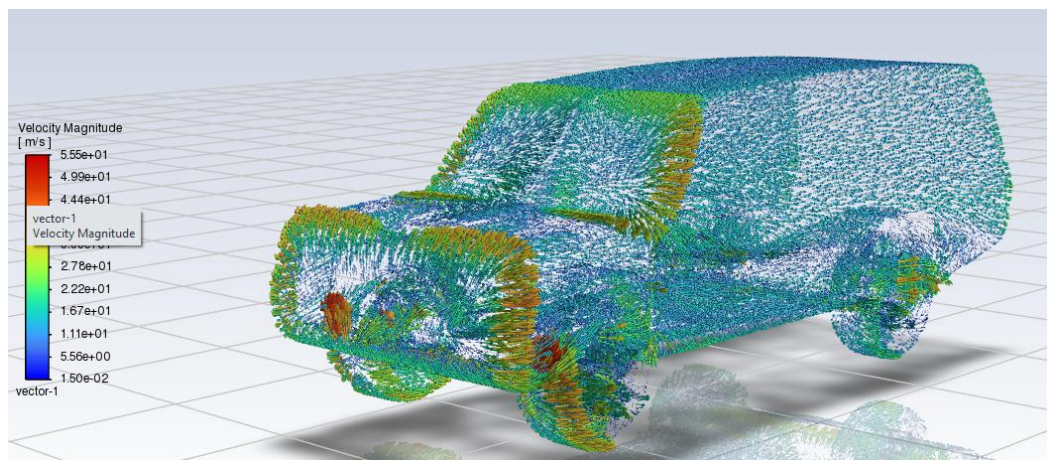
Hệ số nâng  $C_l$  cũng được theo dõi trong suốt quá trình mô phỏng và dao động quanh giá trị trung bình là  $C_l = 0,04$ . Biểu đồ trong Hình 3.9 thể hiện  $C_l$  khởi đầu ở mức khoảng 0,26, sau đó giảm nhanh và dao động gần mức 0. Từ khoảng bước lặp thứ 200 trở đi,  $C_l$  ổn định quanh 0,04 với biên độ dao động nhỏ hơn.



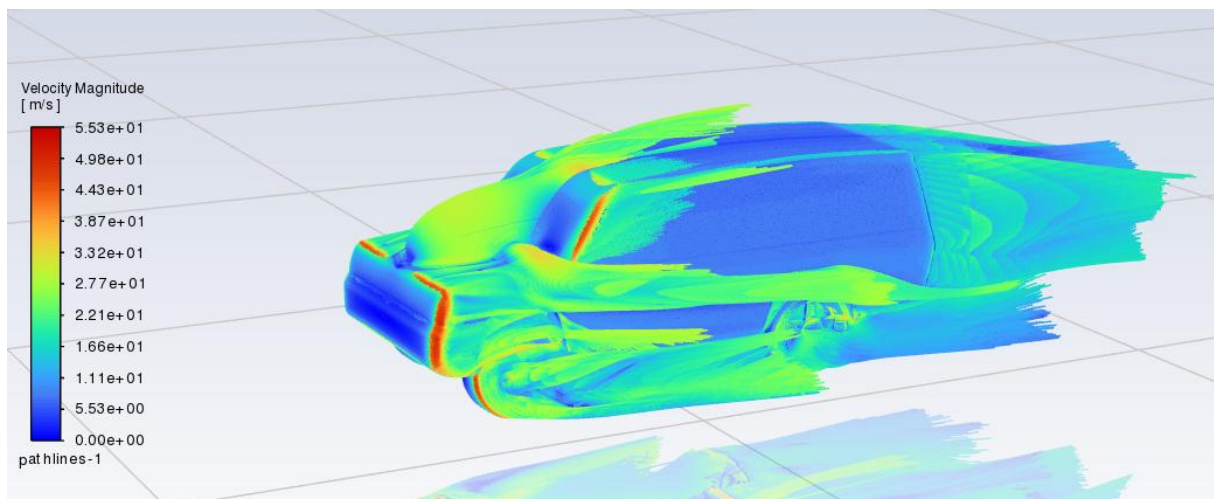
*Hình 3.3. Kết quả hệ số nâng  $C_l$*

Đánh giá: Giá trị  $C_l$  nhỏ cho thấy lực nâng tác động lên thân xe không đáng kể, điều này là tích cực đối với tính ổn định của xe SUV ở tốc độ cao. Một  $C_l$  thấp giúp hạn chế hiện tượng xe bị nâng lên hoặc mất bám đường khi di chuyển nhanh, nhất là trong điều kiện gió ngang hoặc thay đổi hướng đột ngột.

### 3.4.2. Kết quả phân bố trường vận tốc

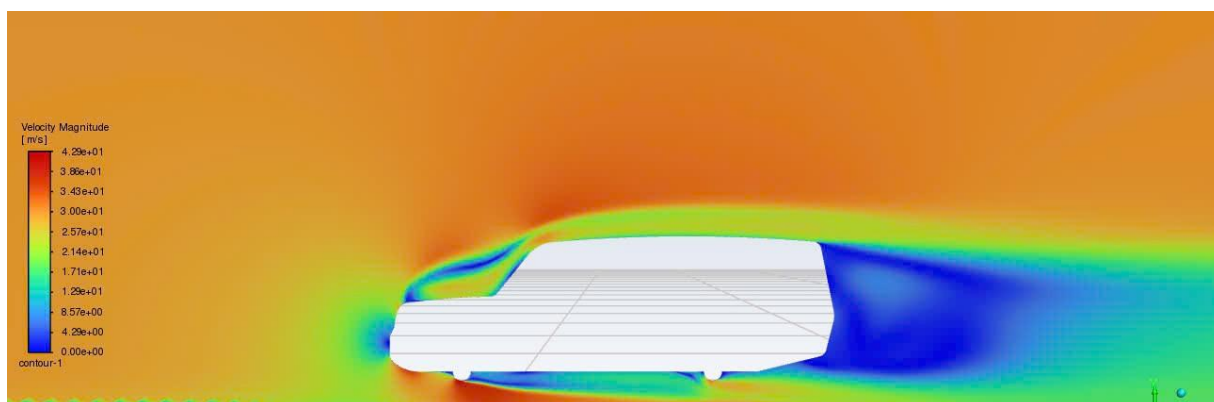


*Hình 3.4. Vector vận tốc trên bề mặt vỏ xe*

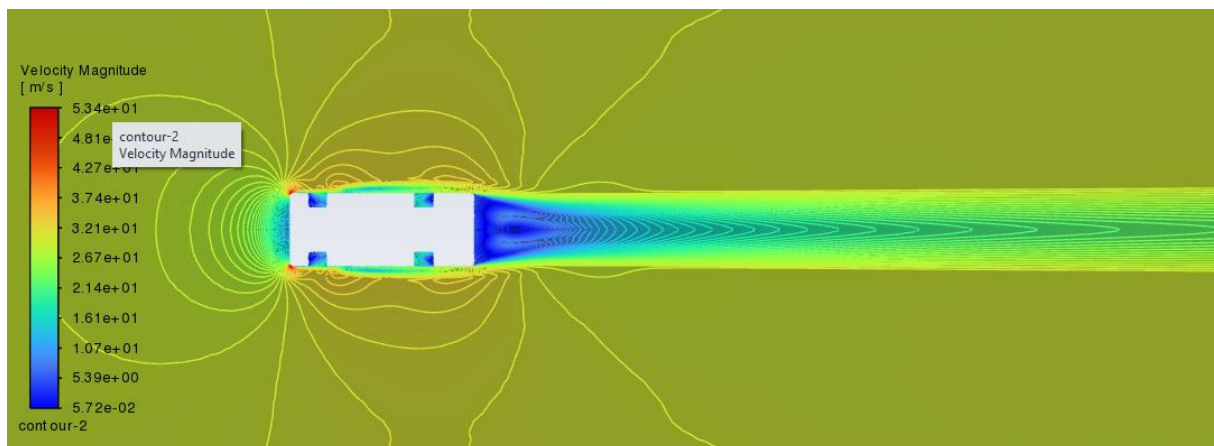


*Hình 3.5. Đường dòng thể hiện vận tốc trong không gian mô phỏng*

Biểu đồ trên hình thể hiện hướng và độ lớn của vận tốc dòng khí xung quanh và trên bề mặt xe. Mũi tên biểu diễn phương chuyển động của dòng khí; màu sắc thể hiện vận tốc (đỏ: cao, xanh: thấp). Phía trước xe cho thấy tốc độ thấp, xuất hiện nhiều vùng màu xanh dương, thể hiện sự giảm tốc do cản phía trước. Trên mui xe và hai bên vận tốc tăng, thể hiện bằng các vùng màu vàng và xanh lá cho thấy không khí trượt qua bề mặt tương đối trơn tru. Gầm xe & hốc bánh: Có nhiều vùng rối, vận tốc thấp (xanh dương), cho thấy hiện tượng tách dòng hoặc xoáy.

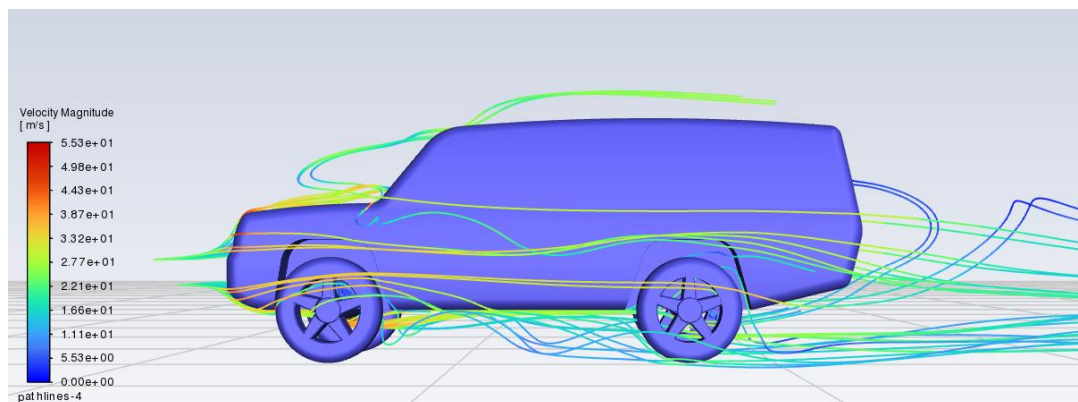


*Hình 3.6. Phân bố vận tốc trong mặt phẳng đối ứng dọc của xe*



*Hình 3.7. Phân bố vận tốc trong mặt cắt ngang đi qua điểm giữa của vỏ xe*

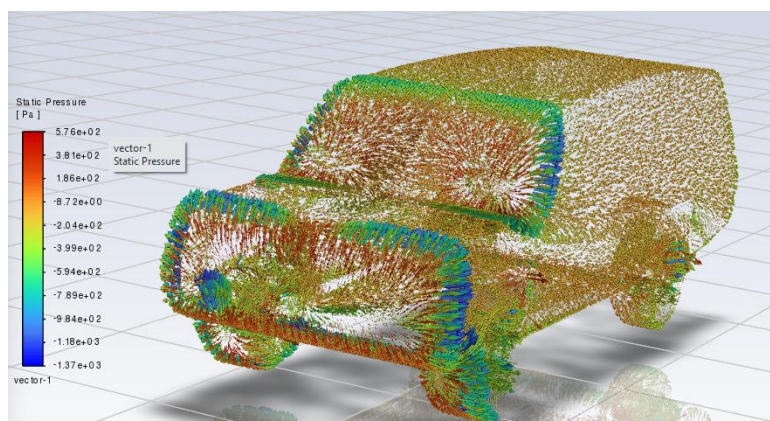
Quan sát thấy dòng khí bị cản lại tại khu vực trước mô hình. Tại vùng đầu mô hình luôn luôn có vận tốc nhỏ hơn ở những vùng khác do dòng khí khi di chuyển đến vùng này sẽ xuất hiện một điểm dừng. Ngay tại điểm dừng, vận tốc dòng khí bằng không và dòng khí sẽ chia làm hai phần, một phần đi dọc theo phía trên thân mô hình và một phần đi dọc theo phía dưới thân mô hình. Tại những khu vực có biên dạng thay đổi đột ngột, dòng khí bị tách rời đây là một trong những nguyên nhân làm thay đổi sự phân bố vận tốc quanh mô hình. Phía sau xe có vùng màu xanh lam cho thấy hiện tượng tụt áp và xoáy – là nguyên nhân chính gây ra lực cản kéo. Loại bỏ hoặc giảm kích thước của những vùng xoáy này đồng nghĩa với việc giảm hệ số cản  $C_d$ . Dưới gầm xe có hiện tượng giảm tốc và xoáy nhẹ (vùng xanh đậm), phản ánh sự phức tạp trong vùng dòng chảy dưới thân xe.



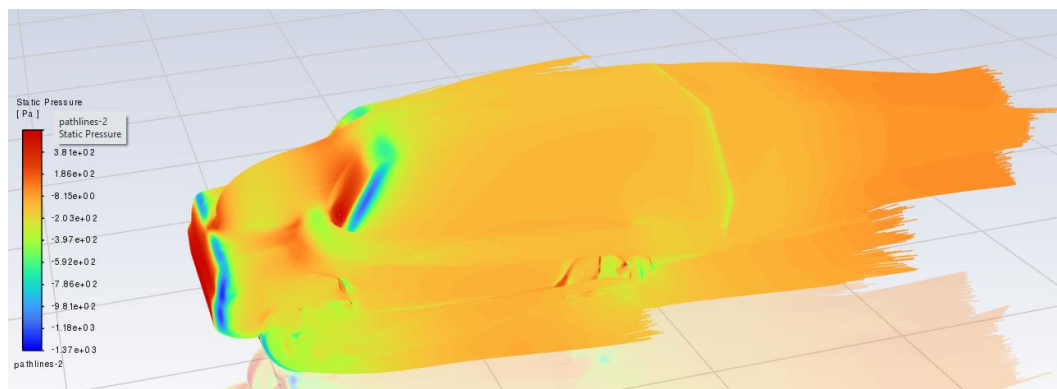
*Hình 3.8. Đường dòng vận tốc chạy qua xe*

Biểu đồ trên thể hiện các đường dòng chuyển động của không khí quanh xe. Phía đuôi xe có các đường dòng bắt đầu phân tán, cho thấy vùng tách dòng – nguyên nhân gây lực cản lớn. Dưới gầm xe có hiện tượng xoáy nhẹ do hình dạng và bánh xe.

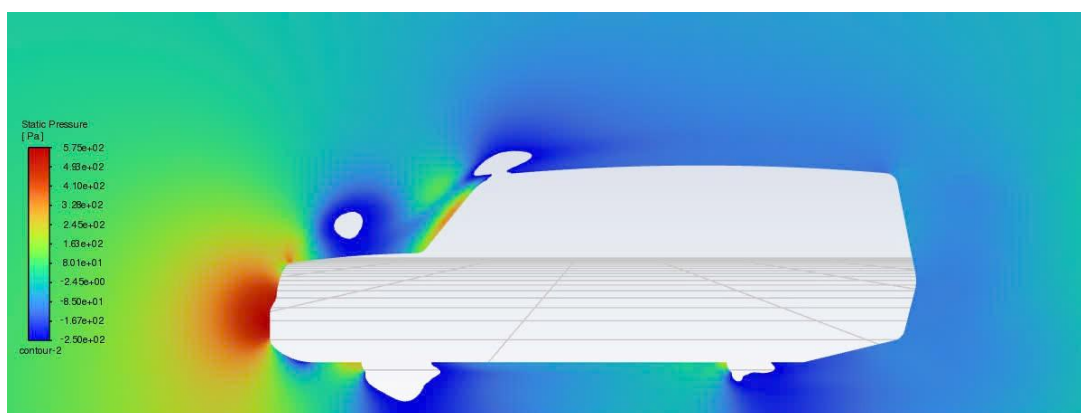
### 3.4.3. Phân bố trường áp suất



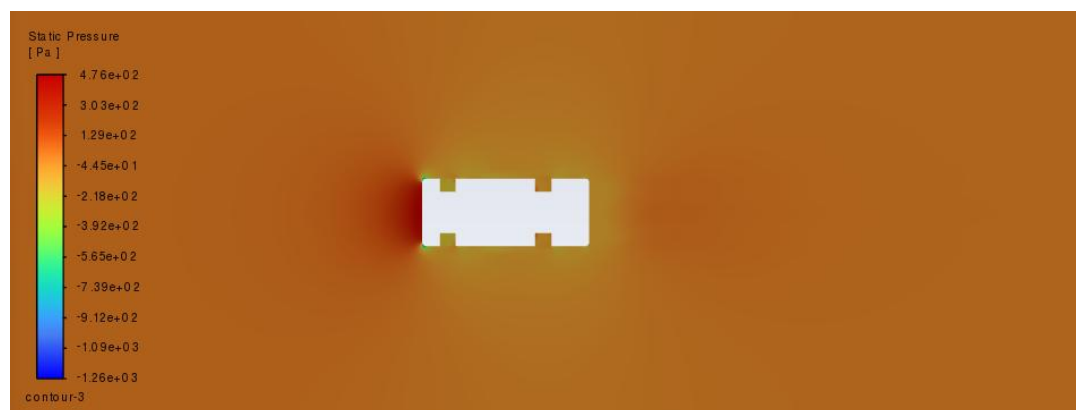
*Hình 3.9. Vector áp suất trên bề mặt vỏ xe*



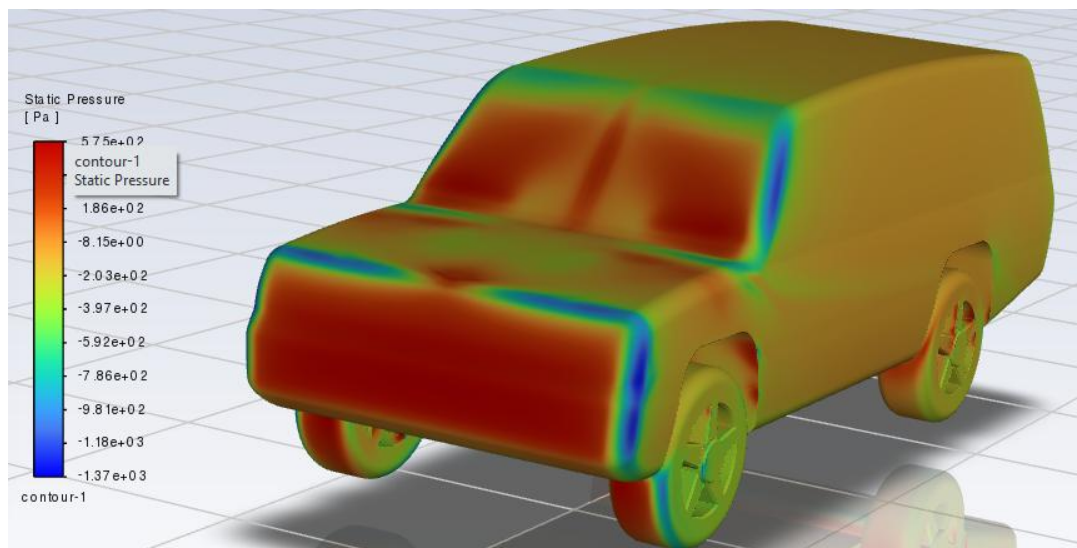
Hình 3.10. Đường dòng thể hiện áp suất trong không gian mô phỏng



Hình 3.11. Phân bố trường áp suất trên mặt phẳng đối xứng dọc



Hình 3.12. Phân bố áp suất trong mặt cắt ngang đi qua điểm giữa vỏ xe

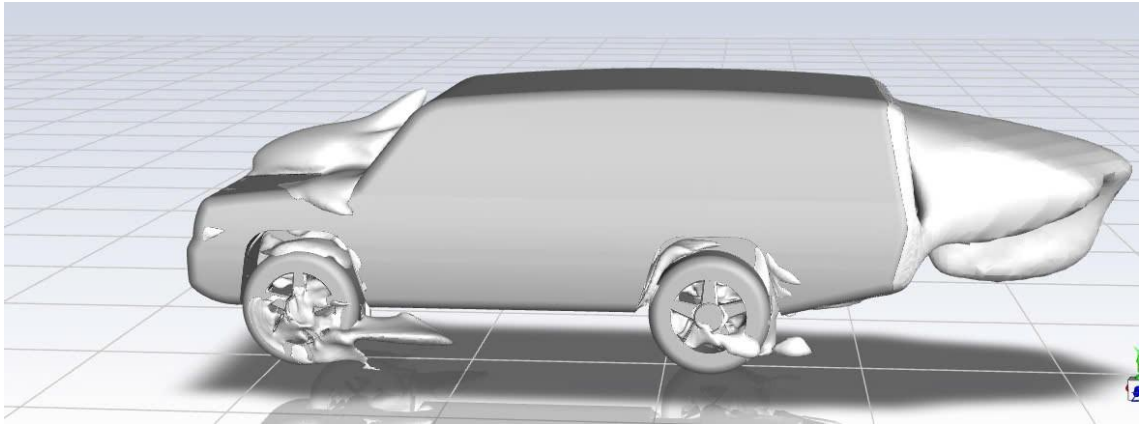


*Hình 3.13. Phân bố áp suất trên bề mặt vỏ xe*

Kết quả cho thấy tại khu vực đầu xe và kính chắn gió chịu áp suất lớn nhất. Sau đó áp suất giảm từ đầu nóc xe đến đuôi xe, hiện tượng này do dòng khí bị phân tách khi tác dụng lên bề mặt mô hình làm xuất hiện các điểm tách rời, điểm ngưng tụ và các vùng xoáy xung quanh mô hình. Nhận thấy áp suất tại khu vực phía trước mô hình lớn hơn nhiều so với áp suất tại khu vực đuôi mô hình.

Như vậy, sự phân bố áp suất quanh mô hình luôn tuân theo định luật Bernoulli. Chính sự chênh lệch áp suất ở các khu vực khác nhau xung quanh mô hình là yếu tố cơ bản tạo nên lực cản khí động khi ô tô di chuyển. Sự chênh lệch áp giữa khu vực trước mô hình và khu vực đuôi mô hình càng lớn làm cho lực cản khí động càng tăng. Như vậy, để làm giảm lực cản khí động cần giảm sự chênh lệch áp giữa khu vực phía trước và sau mô hình.

#### 3.4.4. Dòng chảy gần bề mặt thân xe



*Hình 3.14. Iso-surface*

Iso-surface: là biên dạng dòng khí bám sát toàn bộ bề mặt xe được thể hiện như hình, nếu biên dạng dòng khí càng bám sát vào bề mặt xe điều đó chứng tỏ sự tác động của lực cản không khí tại vị trí đó càng thấp và ngược lại. Các iso-surfaces trắng xuất hiện xung quanh thân xe, đặc biệt ở:

- Đầu xe: Có một mảng "phồng" ra rõ rệt → Đây là vùng tách dòng/giảm vận tốc mạnh do va chạm trực diện với không khí.
- Quanh bánh xe: Xuất hiện các vùng iso-surface không đối xứng → Dòng không khí bị nhiễu loạn do chuyển động quay của bánh .
- Đuôi xe: Một vùng iso-surface kéo dài hình bầu → vùng tách dòng phía sau xe, nơi dòng không khí không còn bám sát bề mặt và hình thành vùng áp suất thấp.

Biểu đồ iso-surface này rất hữu ích để xác định vùng dòng chảy chậm hoặc tách dòng quanh xe. Từ đó có thể lựa chọn các phương án tối ưu như: Giảm vùng iso-surface ở đầu xe bằng thiết kế bo tròn/mượt hơn. Thiết kế đuôi xe kiểu thuôn để hạn chế vùng tách dòng sau xe.

### 3.5. Kết luận chương 3

Chương 3 đã triển khai mô phỏng khí động học cho xe Toyota Land Cruiser dựa trên mô hình và phương pháp đã thiết lập, qua đó thu được các thông số quan trọng như hệ số cản  $C_d$ , hệ số nâng  $C_l$ , phân bố vận tốc, áp suất và cấu trúc xoáy quanh thân xe. Kết quả cho thấy phần đầu, kính chắn gió, vùng trần – đuôi và gầm xe là những khu vực tạo ra lực cản lớn nhất, đồng thời là nơi hình thành các vùng xoáy chính.

Phân tích dữ liệu cho thấy hệ số cản đạt giá trị ổn định sau số vòng lặp nhất định, chứng tỏ mô phỏng đã hội tụ và đáng tin cậy. Phân bố áp suất cho thấy rõ sự chênh lệch áp suất giữa mặt trước và sau xe – nguyên nhân chính gây ra lực cản khí động. Kết quả vận tốc và đường dòng thể hiện rõ các khu vực tách dòng và xoáy lớn ở đuôi xe, đồng thời minh họa hiệu quả của các thay đổi thiết kế trong việc giảm hiện tượng này.

Ngoài ra, so sánh trước và sau khi áp dụng một số điều chỉnh hình dáng cho thấy  $C_d$  có xu hướng giảm, chứng minh khả năng cải thiện hiệu suất khí động học thông qua tối ưu hóa thiết kế. Chương này không chỉ cung cấp số liệu định lượng mà còn đưa ra những phân tích định tính, làm rõ cơ chế hình thành lực cản và vùng xoáy, qua đó xác nhận tính khả thi của các giải pháp cải tiến đề xuất.

## KẾT LUẬN

Đề tài “**Nghiên cứu ảnh hưởng hình dáng xe SUV tới đặc tính khí động học bằng ANSYS Fluent**” đã hoàn thiện trọn vẹn quy trình từ khảo sát lý thuyết, xây dựng mô hình, thiết lập điều kiện mô phỏng, đến phân tích và đánh giá kết quả. Thông qua việc áp dụng mô hình dòng rối  $k-\omega$  SST kết hợp lưới Poly-Hexcore, mô phỏng CFD đã cho thấy rõ ảnh hưởng của hình dáng vỏ xe SUV tới hệ số cản  $C_d$ , lực nâng  $C_l$  và cấu trúc xoáy dòng chảy.

Kết quả nghiên cứu không chỉ khẳng định tầm quan trọng của khí động học trong thiết kế xe mà còn cung cấp cơ sở khoa học để cải thiện hình dáng nhằm giảm lực cản, tiết kiệm nhiên liệu, giảm phát thải và nâng cao độ ổn định khi vận hành ở tốc độ cao. Đặc biệt, các phân tích chi tiết về phân bố áp suất, vận tốc và vùng xoáy giúp các nhà thiết kế nhận diện chính xác các khu vực cần ưu tiên tối ưu.

Giá trị thực tiễn của đề tài nằm ở khả năng áp dụng trực tiếp trong giai đoạn thiết kế sản phẩm, từ đó rút ngắn thời gian thử nghiệm hầm gió, giảm chi phí nghiên cứu – phát triển, và góp phần nâng cao năng lực thiết kế, chế tạo xe SUV trong nước. Đồng thời, kết quả này cũng mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo, bao gồm mô phỏng chi tiết hơn với các yếu tố như gương chiếu hậu, bánh xe quay, hoặc tác động của gió bên, nhằm tiến gần hơn đến điều kiện vận hành thực tế.

Với những đóng góp về mặt khoa học và thực tiễn, nghiên cứu này được kỳ vọng sẽ trở thành tài liệu tham khảo hữu ích cho các kỹ sư, nhà thiết kế và đơn vị sản xuất trong lĩnh vực ô tô, đặc biệt trong bối cảnh ngành công nghiệp xe SUV tại Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ và đòi hỏi những giải pháp kỹ thuật tiên tiến để cạnh tranh trên thị trường.

Dựa trên các kết quả nghiên cứu của đề tài đề án tốt nghiệp, học viên đề xuất một số hướng nghiên cứu phát triển như sau:

- Tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để đưa ra kết quả thực tế và đánh giá so sánh với kết quả mô phỏng bằng phần mềm chuyên dụng.
- Nghiên cứu thêm ảnh hưởng của lực nâng và ảnh hưởng của gió ngang tới chuyển động của ô tô.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt

- [1] Đặng Tiến Phúc, *Mô phỏng đặc tính khí động lực học trên dòng xe SUV*, Tạp chí Nghiên cứu khoa học và Công nghệ, Số 40, 2019.
- [2] Tô Hoàng Tùng, *Nghiên cứu cải thiện dạng khí động học vỏ xe khách lắp ráp tại Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật cơ khí động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2016.
- [3] Đỗ Tiến Quyết, *Nghiên cứu lực cản khí động học của xe du lịch bằng phần mềm Ansys*, Tạp chí Nghiên cứu khoa học - Đại học Sao Đỏ, 2019.
- [4] Nguyễn Anh Ngọc, Lê Hồng Quân, Trần Phúc Hòa, Hoàng Quang Tuấn, Chu Đức Hùng, *Nghiên cứu cải thiện hình dáng khí động học của thân vỏ xe điện HAUI-EV2*. Tạp chí Khoa học & Công nghệ số 55.2019
- [5] Phan Thành Long (2024), *Đánh giá ảnh hưởng của các loại lưới phi cấu trúc trong quá trình mô phỏng đặc tính khí động học ô tô*. Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng.
- [6] Võ Văn Hường, Nguyễn Tiến Dũng, Dương Ngọc Khánh, Đàm Hoàng Phúc (2014), *Động lực học ô tô*, NXB Giáo dục Việt Nam, Hà Nội.

### Tiếng Anh

- [7] A. Henze, W. Schröder Fahrzeug- und Windradaerodynamik Automobiles, *Institute of Aerodynamics*, RWTH Aachen University.

- [8] Johannes D. Wojciak (2012), *Quantitative Analysis of Vehicle Aerodynamics during Crosswind Gusts. Thesis PhD, Institute of Aerodynamics and Fluid Dynamics*, Technische Universität München.
- [9] M. Laurent Burgade (1996), *Aerodynamique Automobile: Approche numerique et experimentale*. PSA Peugeot-Citroen.
- [10] *Introduction to ANSYS Fluent*, Release 14.5, November 15, 2012.
- [11] Marco Lanfri (2005), “*Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT*”, Version 1.2
- [12] J. Levin, R.Rigdal (2011) “*Aerodynamic Analysis of Drag Reduction Devices on the Underbody for SAAB 9-3 by Using CFD*”, Master’s Thesis, Chalmers University of Technology.
- [13] H K Versteeg and W Malalasekera (2007), “*An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the finite volume method*”, Second Edition.
- [14] Nguyen Van Thang, Ha Tien Vinh, Bui Dinh Tri, Nguyen Duy Trong (2018). “*Numerical simulation of airflow around vehicle models.*” Vietnam Journal of Science and Technology.
- [15] Laurent Dumas (2008). *CFD-based Optimization for Automotive Aerodynamics*. Université Pierre et Marie Curie.
- [16] *Aerodynamic analysis and optimisation of the rear wing of a WRC car*. Oxford Brookes University, 2012.
- [17] Pramod Nari Krishnani, Dongmei Zhou, *CFD Analysis of Drag Reduction For A Generic SUV*, Proceedings of the ASME 2009 International

Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 13-19, Lake Buena Vista, Florida, USA.

- [18] Akshay Parab, Ammar Sakarwala, Bhushan Paste, Vaibhav Patil (2014), “*Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5*”, International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering, Vol.1 Issue.4, pp. 7-13.
- [19] Raphael Lienhart (2019), *CFD STUDY OF FLOW AROUND AHMED BODY*, University of Windsor.
- [20] R. K. Petkar, S. G. Kolgiri, S. S. Ragit (2017), *Study of Front-Body of Formula-One Car for Aerodynamics using CFD*
- [21] Manan Desai, S. A. Channiwala, H. J. Nagarsheth (2008), *Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car*.
- [22] M. Corallo , J. Sheridan, M.C. Thompson (2015), *Effect of aspect ratio on the near-wake flow structure of an Ahmed body*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.