

NGHIÊN CỨU VÀ MÔ PHỎNG KIỂM TRA ĐỘ BỀN Ô TÔ TRONG TRƯỜNG HỢP VA CHẠM XIÊN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

RESEARCH AND SIMULATION TESTING OF CAR DURABILITY IN CASE OF
OBLIQUE COLLISION APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD

TS. Nguyễn Minh Thắng

Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Email: thangnm@haui.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày một phân tích định lượng về khả năng chống va chạm (crashworthiness) của mẫu xe KIA Pride 2004 trong kịch bản va chạm xiên, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Một mô hình số toàn diện của xe đã được xây dựng trên nền tảng phần mềm Altair HyperWorks, trong đó các đặc tính vật liệu đàn hồi-dẻo của các cấu kiện chính như thép, kính và cao su được định nghĩa chi tiết. Kịch bản va chạm xiên được mô phỏng bằng bộ giải Radioss để đánh giá các thông số động lực học quan trọng, bao gồm trường chuyển vị, phân bố ứng suất Von Mises và sự biến thiên năng lượng. Kết quả chỉ ra rằng biến dạng và ứng suất cực đại tập trung tại các kết cấu phần đầu xe, trong khi ứng suất tổng thể vẫn nằm trong giới hạn bền của vật liệu, đảm bảo tính toàn vẹn của khoang hành khách. Nghiên cứu cung cấp bộ dữ liệu định lượng về hành vi kết cấu của một mẫu xe thế hệ cũ, qua đó đưa ra các khuyến nghị thiết kế nhằm nâng cao hiệu năng an toàn.

Từ khóa: An toàn ô tô; Va chạm xiên; Phương pháp phần tử hữu hạn; Khả năng chống va chạm; KIA Pride 2004.

ABSTRACT

This study presents a quantitative analysis of the crashworthiness of a KIA Pride 2004 model under an oblique collision scenario using the Finite Element Method (FEM). A comprehensive numerical model of the vehicle was developed on the Altair HyperWorks platform, in which the elastic-plastic material properties of key components such as steel, glass, and rubber were defined in detail. The oblique impact scenario was simulated using the Radioss solver to evaluate critical dynamic parameters, including the displacement field, Von Mises stress distribution, and energy variation. The results indicate that maximum deformations and stresses are concentrated in the front-end structures, while the overall stress remains within the material's strength limits, ensuring the integrity of the passenger compartment. The study provides a quantitative dataset on the structural behavior of an older-generation vehicle, thereby offering design recommendations to enhance safety performance.

Keywords: Automotive safety; Oblique impact; Finite element method; Crashworthiness; KIA Pride 2004.

1. GIỚI THIỆU

An toàn phương tiện giao thông là một mục tiêu trọng yếu và không ngừng phát triển trong ngành kỹ thuật ô tô. Theo truyền thống, các thử nghiệm va chạm vật lý là tiêu chuẩn vàng để đánh giá độ bền, nhưng chúng đi kèm với chi phí cao, tốn thời gian và khó lặp lại [1], [2]. Để giải quyết những hạn chế này, các nhà nghiên cứu như Lozia (2022) đã đề xuất các khung khái niệm sử dụng phương pháp mô phỏng số, đặc biệt là phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), như một giải pháp thay thế hiệu quả, cho phép đơn giản hóa quy trình và giảm chi phí trong việc kiểm tra độ bền của các thành phần xe [3].

Các ứng dụng thực tiễn của FEM trong phân tích va chạm ngày càng trở nên tinh vi. Chẳng hạn, Ozcan và Ersoy (2021) đã chứng minh một quy trình phổ biến là chuyển đổi dữ liệu hình học 3D của xe thành các mô hình phần tử hữu hạn để tiến hành mô phỏng trong các phần mềm chuyên dụng như LS-DYNA, cho phép phân tích chi tiết các phản ứng của kết cấu [4]. Tuy nhiên, việc mô hình hóa chính xác các kịch bản va chạm phức tạp không phải không có thách thức. Nghiên cứu của Demiyanyushko và cộng sự (2020) đã chỉ ra những khó khăn trong việc mô tả đúng các hiện tượng như ma sát và biến dạng lớn khi mô phỏng tương tác giữa xe và rào chắn [5]. Trong số các kịch bản phức tạp này, va chạm xiên (oblique collision) là một lĩnh vực được quan tâm đặc biệt. Ví dụ, công trình của Kolesnikova (2021) đã tập trung vào việc xác thực các mô hình đơn giản hóa, như biểu diễn xe như một điểm vật liệu, để phát triển các thuật toán phân tích chuyển động của xe khi va chạm xiên với các rào chắn [6].

Mặc dù các nghiên cứu trên đã cung cấp những hiểu biết sâu sắc về động lực học va chạm và các phương pháp mô phỏng, một

khoảng trống đáng chú ý vẫn tồn tại trong việc phân tích khả năng chống va chạm của các mẫu xe đời cũ, vốn vẫn còn được lưu hành rộng rãi tại các thị trường đang phát triển như Việt Nam. Những phương tiện này, được thiết kế theo các tiêu chuẩn an toàn của thập kỷ trước, có thể không đáp ứng được các yêu cầu bảo vệ hành khách trong các điều kiện va chạm hiện đại. Mẫu xe KIA Pride 2004 là một ví dụ điển hình, đại diện cho một lượng lớn xe du lịch thế hệ cũ đang được sử dụng hằng ngày, nhưng lại thiếu dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng về độ bền kết cấu.

Để giải quyết khoảng trống này, nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng và phân tích một mô hình phần tử hữu hạn chi tiết của xe KIA Pride 2004 để mô phỏng kịch bản va chạm xiên. Mục tiêu của bài báo là cung cấp một phân tích định lượng về hành vi kết cấu của xe, bao gồm các thông số về biến dạng, trường ứng suất và khả năng hấp thụ năng lượng. Kết quả của nghiên cứu không chỉ làm phong phú thêm cơ sở dữ liệu về an toàn xe cho các mẫu xe cũ mà còn đưa ra những khuyến nghị thiết thực nhằm cải thiện độ bền và an toàn cho một lượng lớn người dùng phương tiện.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị mô hình xe

Đối tượng nghiên cứu được lựa chọn trong công trình này là mẫu xe Kia Pride 2004.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của xe Kia Pride 2004

Thông số	Chi tiết
Kích thước tổng thể (Dài × Rộng × Cao)	$3.615 \times 1.605 \times 1.460$ mm
Chiều dài cơ sở	2.345 mm
Trọng lượng không tải	~ 780 kg



Mô hình hình học 3D của xe được xây dựng và nhập vào môi trường tiền xử lý Altair HyperMesh dưới định dạng STEP [7-9].



Hình 1. Mô hình hình học 3D của xe KIA Pride 2004.

Các thao tác làm sạch và đơn giản hóa hình học được thực hiện để loại bỏ các chi tiết không ảnh hưởng đến độ cứng kết cấu (ví dụ: các lỗ nhỏ, bo tròn) và sửa lỗi bề mặt nhằm đảm bảo chất lượng cho quá trình chia lưới sau này.

2.2. Rời rạc hóa bằng phần tử hữu hạn

Mô hình hóa phần tử hữu hạn được thực hiện bằng Altair HyperMesh [8], với thân xe

được rời rạc hóa chủ yếu bằng các phần tử vỏ 2D, phù hợp để biểu diễn các kết cấu ô tô dạng thành mỏng. Chất lượng lưới được đánh giá và tinh chỉnh dựa trên các tiêu chí sau:

- Tỷ lệ khung hình: < 5 ;
- Góc xiên: $< 45^\circ$;
- Độ cong vênh: $< 10^\circ$;
- Hệ số Jacobian: > 0.6 .

Các ngưỡng này đảm bảo sự ổn định về mặt số học và độ trung thực về mặt hình học, đặc biệt ở những vùng dự kiến sẽ chịu biến dạng đáng kể, chẳng hạn như cản trước và hốc bánh xe.

2.3. Mô hình hóa vật liệu

Mô phỏng sử dụng ba định nghĩa vật liệu chính tương ứng với các bộ phận ô tô trong thực tế. Mỗi vật liệu được mô hình hóa với hành vi đàn hồi-nhựa dẻo phù hợp, sử dụng các thông số từ sổ tay kỹ thuật và tài liệu đã được kiểm chứng:

Bảng 2. Thuộc tính vật liệu sử dụng trong mô phỏng

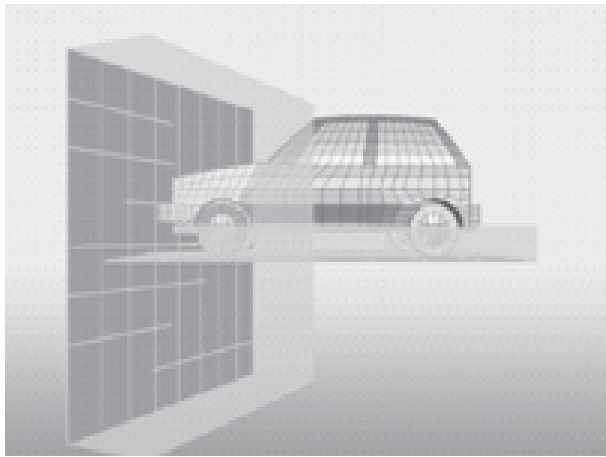
Thuộc tính cơ học	Đơn vị	Thép	Kính	Cao su
		Thân xe & Khung	Kính chắn gió	Lốp xe
Mật độ (ρ)	t/mm ³	7.9×10^{-9}	2.5×10^{-9}	2.0×10^{-9}
Mô-đun Young (E)	MPa	210,000	76,000	200
Hệ số Poisson (ν)	-	0.3	0.3	0.49
Giới hạn chảy (σ_y)	MPa	200	192	1.0×10^{30} *
Hệ số hóa cứng (K)	MPa	450	220	-
Số mũ hóa cứng (n)	-	0.5	0.32	-
Ứng suất bền (σ_b)	MPa	425	-	-

*Giá trị giới hạn chảy rất lớn của cao su được sử dụng để mô hình hóa vật liệu có hành vi gần như hoàn toàn đàn hồi (hyperelastic) trong phạm vi mô phỏng, tức là vật liệu không bị biến dạng dẻo.

Các định nghĩa vật liệu này đã được áp dụng cho các nhóm thành phần phù hợp trong HyperCrash.

2.4. Thiết lập điều kiện biên và tải trọng

Kịch bản va chạm xiên được thiết lập trong HyperCrash [9]. Một bức tường cứng, không biến dạng được mô hình hóa. Mô hình xe được gán vận tốc ban đầu là 15,600 mm/s (tương đương 56 km/h) theo phương hợp với trục dọc của xe một góc 30°.



Hình 2. Mô hình phần tử hữu hạn sau khi thiết lập điều kiện biên và tải trọng va chạm.

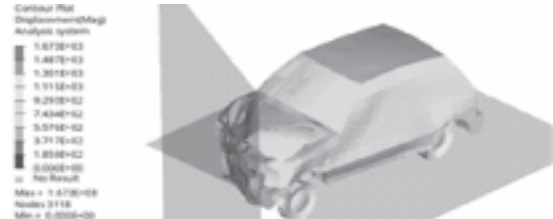
Thiết lập này tuân thủ một phần các khuyến nghị của quy trình thử nghiệm va chạm lệch tâm của Euro NCAP [1, 2]. Tương tác tiếp xúc giữa các bề mặt của xe và giữa xe với tường cứng được định nghĩa bằng thuật toán tiếp xúc bề mặt-bề mặt.

2.5. Cấu hình bộ giải và thiết lập đầu ra

Bài toán được giải bằng bộ giải động lực học tường minh Radioss [7]. Tổng thời gian mô phỏng là 50 ms. Các yêu cầu về dữ liệu đầu ra được thiết lập để ghi lại các thông số cần phân tích như trường chuyển vị, ứng suất, năng lượng và lực phản ứng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích trường chuyển vị



Hình 3. Kết quả mô phỏng trường chuyển vị tổng (mm) tại thời điểm biến dạng cực đại.

Phân tích trường chuyển vị Hình 3 cho thấy biến dạng được tập trung hiệu quả tại vùng đầu xe. Chuyển vị cực đại đạt giá trị 1.673×10^3 mm, ghi nhận tại khu vực bánh trước bên trái (nút 3118) - vị trí chịu tác động trực tiếp của va chạm. Ngược lại, các vùng kết cấu phía sau, đặc biệt là khoang hành khách, có độ chuyển vị rất thấp, cho thấy tính toàn vẹn của không gian an toàn được bảo toàn. Kết quả này khẳng định vai trò của kết cấu đầu xe trong việc hấp thụ và tiêu tán năng lượng, ngăn chặn sự xâm nhập vào các vùng trọng yếu.

3.2. Phân bố ứng suất Von Mises

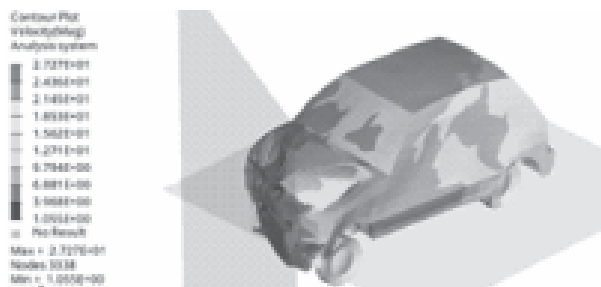
Trường ứng suất Von Mises (Hình 4) cho thấy ứng suất đỉnh đạt 0.8642 MPa, cục bộ tại vùng tiếp xúc va chạm. Giá trị này thấp hơn đáng kể so với giới hạn chảy của vật liệu thép (200 MPa), cho thấy phần lớn kết cấu của xe vẫn hoạt động trong miền đàn hồi.



Hình 4. Kết quả mô phỏng phân bố ứng suất tương đương Von Mises (MPa) trên kết cấu.

Sự tập trung ứng suất cao nhất tại giao diện va chạm và giảm dần về phía sau phản ánh sự phân tán tải trọng hiệu quả. Việc không có vùng ứng suất lớn lan vào khoang hành khách một lần nữa xác nhận khả năng bảo vệ của kết cấu.

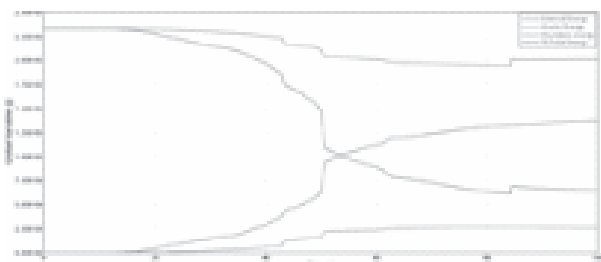
3.3. Phản ứng vận tốc



Hình 5. Kết quả mô phỏng trường vận tốc trên kết cấu xe trong quá trình va chạm.

Hình 5 mô tả phân bố vận tốc trên toàn thân xe trong quá trình va chạm. Có thể quan sát thấy vận tốc lớn nhất đạt khoảng 27.27 m/s tại thời điểm ban đầu, tập trung ở bánh xe và phần đầu xe – nơi tiếp xúc đầu tiên với vật cản. Sau va chạm, vận tốc tại các khu vực này giảm rõ rệt, trong khi phần thân sau vẫn còn giữ vận tốc cao hơn trong một thời gian ngắn, cho thấy quá trình lan truyền và hấp thụ xung lực theo hướng từ trước ra sau. Sự tiêu tán động năng hiệu quả này là một chỉ số quan trọng cho thấy hiệu năng tốt của các vùng hấp thụ xung lực.

3.4. Phân tích khả năng hấp thụ năng lượng



Hình 6. Biểu đồ biến thiên của động năng, nội năng và tổng năng lượng trong quá trình va chạm.

Hình 6 mô tả đặc tính lực phản ứng của tường cứng trong suốt quá trình va chạm. Kết quả cho thấy lực phản ứng đạt cực đại vào khoảng 50 mili-giây, với giá trị xấp xỉ $8.0E+04$ kN, đúng tại thời điểm xe giảm tốc hoàn toàn. Sự chuyển đổi này cho thấy năng lượng va chạm đã được hấp thụ chủ yếu thông qua biến dạng của các cấu kiện. Một lượng nhỏ năng lượng bị mất đi do các cơ chế số học nhưng vẫn trong giới hạn chấp nhận được, xác thực độ tin cậy của mô hình.

3.5. Đặc tính lực phản ứng

Lực phản ứng tại tường cứng đạt giá trị cực đại khoảng 8.0×10^4 kN tại thời điểm 50 ms. Đỉnh lực này tương ứng với thời điểm xe chịu gia tốc âm lớn nhất, phản ánh mức độ tải trọng tối đa mà kết cấu phải chịu đựng. Diễn biến của lực phản ứng theo thời gian cung cấp dữ liệu quan trọng để đánh giá và tối ưu hóa các đường truyền tải trọng trong thiết kế.

3.6. Các vùng biến dạng dẻo

Phân tích biến dạng dẻo cho thấy giá trị lớn nhất đạt 2.408 mm, tập trung cục bộ tại vùng đầu xe. Sự xuất hiện của biến dạng dẻo, dù nhỏ, xác nhận rằng kết cấu đã chịu hư hỏng vĩnh viễn tại vùng hấp thụ xung lực, đúng như mục tiêu thiết kế. Điều này cho thấy cơ chế tiêu tán năng lượng thông qua biến dạng không phục hồi đã hoạt động, tuy nhiên, độ lớn của biến dạng cũng gợi ý tiềm năng cải tiến về vật liệu hoặc hình học để kiểm soát tốt hơn quá trình phá hủy.

3.7. Khuyến nghị

Dựa trên các kết quả phân tích số đã trình bày, một số khuyến nghị thiết kế được đề xuất nhằm cải thiện hiệu năng hấp thụ năng

lượng và nâng cao khả năng bảo vệ hành khách khi va chạm:

- Ứng dụng vật liệu tiên tiến: Khuyến nghị sử dụng thép cường độ siêu cao (UHSS) hoặc vật liệu lai (hybrid) như composite sợi carbon kết hợp với thép tại các khu vực chịu tải trọng lớn, điển hình như cột A và các thanh dầm dọc. Việc này giúp tăng khả năng chịu lực, giảm trọng lượng và hạn chế biến dạng vĩnh viễn trong vùng an toàn.

- Tăng cường mối nối kết cấu: Cần chú trọng thiết kế mối nối và giao diện giữa các cấu kiện để đảm bảo phân bố tải trọng hợp lý, tránh tình trạng tập trung ứng suất – nguyên nhân chính gây hỏng cục bộ. Giải pháp này hỗ trợ lan truyền lực va chạm theo hướng mong muốn và tăng tính toàn vẹn tổng thể của kết cấu.

- Tích hợp hình học hấp thụ năng lượng: Nên áp dụng các cấu trúc hấp thụ năng lượng kiểu lũy tiến, chẳng hạn như kết cấu lượn sóng hoặc vùng hấp thụ xung lực phân đoạn, giúp điều tiết tốc độ biến dạng và kiểm soát tốt hơn phản ứng động học khi va chạm, từ đó bảo vệ người ngồi trên xe hiệu quả hơn [10-11].

Các khuyến nghị nêu trên được củng cố bởi kết quả mô phỏng có độ tin cậy cao, và có thể đóng vai trò như một nền tảng thiết kế cho các dòng xe hiện đại có hiệu năng va chạm vượt trội, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp các hệ thống an toàn chủ động trong tương lai.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xây dựng và phân tích thành công một mô hình phần tử hữu hạn chi tiết của xe KIA Pride 2004 nhằm mô phỏng kịch bản va chạm xiên ở vận tốc 56 km/h. Kết

quả mô phỏng cho thấy biến dạng tập trung chủ yếu tại các cấu kiện phía trước xe, trong khi khoang hành khách vẫn giữ được tính toàn vẹn kết cấu – đáp ứng yêu cầu bảo vệ người ngồi trong xe. Mặc dù ứng suất Von Mises cực đại vẫn dưới giới hạn chảy của thép, sự xuất hiện của biến dạng dẻo tại vùng đầu xe phản ánh tình trạng hư hỏng vĩnh viễn có kiểm soát, đúng với mục tiêu thiết kế vùng hấp thụ xung lực.

Phân tích năng lượng cho thấy quá trình chuyển đổi từ động năng sang nội năng diễn ra hiệu quả, góp phần làm giảm đáng kể vận tốc và lực phản ứng trong thời gian ngắn. Những phát hiện này cung cấp bộ dữ liệu định lượng quan trọng về hành vi kết cấu của một mẫu xe phổ thông thế hệ cũ, vốn còn thiếu trong các tài liệu khoa học hiện hành – đặc biệt tại các thị trường đang phát triển. Đồng thời, nghiên cứu cũng khẳng định độ tin cậy của phương pháp mô phỏng FEM trong việc dự đoán vùng hỏng và đánh giá hiệu năng va chạm, từ đó đề xuất các khuyến nghị thiết kế thực tiễn như sử dụng vật liệu UHSS, tối ưu vùng biến dạng, và tăng cường mối nối.

Tuy vậy, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế. Cụ thể, mô hình hiện chưa tích hợp các yếu tố như mô hình hình nhân hay hệ thống túi khí, nên chưa thể đánh giá trực tiếp rủi ro chấn thương cho hành khách. Trong các nghiên cứu tương lai, việc bổ sung các thành phần này, kết hợp với thử nghiệm thực nghiệm nếu có điều kiện, sẽ giúp nâng cao tính toàn diện và độ xác thực của các kết luận, đồng thời hỗ trợ phát triển các tiêu chuẩn thiết kế an toàn chủ động và bị động cho các dòng xe dân dụng. ❖

Ngày nhận bài: 12/6/2025

Ngày phản biện: 27/6/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lie, A. and Tingvall, C. (2002), “*How Do Euro NCAP Results Correlate with Real-Life Injury Risks? A Paired Comparison Study of Car-to-Car Crashes*”. Traffic Injury Prevention, Vol. 3, No. 4. DOI: 10.1080/15389580214632.
- [2]. Kullgren, A., Lie, A. and Tingvall, C. (2010), “*Comparison Between Euro NCAP Test Results and Real-World Crash Data*”. Traffic Injury Prevention, Vol. 11, No. 6. DOI: 10.1080/15389588.2010.508804.
- [3]. Lozia, Z. (2022), “*A Conceptual Framework for Cost Reduction in Vehicle Component Durability Testing Using Simulation*”. SAE Technical Paper, 2022-01-0456.
- [4]. Ozcan, R. and Ersoy, H. (2021), “*Application of Finite Element Method for Vehicle Crash Test Analysis using LS-DYNA*”. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 5.
- [5]. Demiyanyushko, I., et al. (2020), “*Challenges in Finite Element Modeling of Vehicle-Barrier Collisions: Friction and Large Deformation Phenomena*”. International Journal of Crashworthiness, Vol. 25, No. 3, pp. 312-320.
- [6]. Kolesnikova, T. (2021), “*Validation of a Material Point Model for Oblique Vehicle Collisions with Cable Barriers*”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 147, No. 8.
- [7]. Altair (2022), Radioss Help, Altair HyperWorks 2022.1.
- [8]. Altair (2022), HyperMesh Help, Altair HyperWorks 2022.1.
- [9]. Altair (2022), HyperCrash Help, Altair HyperWorks 2022.1.
- [10]. Klyavin, O., Michailov, A. and Borovkov, A. (2008), “*Finite Element Modeling of The Crash-Tests for Energy Absorbing Lighting Columns*”. Proceedings of ENOC-2008, Saint Petersburg, Russia.
- [11]. Abdel-Nasser, Y., et al. (2013), “*Frontal Crash Simulation of Vehicles Against Lighting Columns in Kuwait Using FEM*”. International Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol. 2, No. 5, pp. 101-105. doi: 10.5923/j.ijtte.20130205.02.