FRI-20.21-1-SITSTL-04

# A COMPARATIVE STUDY ON THE ACCELERATION DYNAMICS OF HYBRID AND CONVENTIONAL VEHICLES [4]

**Assoc. Prof. Daniel Lyubenov, PhD**
Department of Transport,
Univesity of Ruse "Angel Kanchev"
ORCID: 0009-0002-5480-834X
Tel.: (+359) 082 888 605
E-mail: dliubenov@uni-ruse.bg

**Chief Assist. Prof. Dzhemal Topchu, PhD**
Department of Transport,
University of Ruse "Angel Kanchev"
ORCID: 0009-0007-3123-6074
Phone: (+359) 082 888 605
E-mail: dtopchu@uni-ruse.bg

***Abstract:*** *This article presents a quantitative and statistical comparative analysis of the acceleration dynamics of two vehicles: a Lexus NX300h with a hybrid powertrain and a Fiat Stilo 1.6 with an internal combustion engine and manual transmission. Experimental data on acceleration from standstill were obtained for distances ranging from 10 to 70 meters under two operating modes: normal and maximum acceleration. Regression analysis demonstrates that cubic models fit the experimental data exceptionally well. Exploratory data analysis and boxplot visualizations indicate good measurement repeatability and minimal influence from random experimental factors. Data regarding the average acceleration of both vehicles under the two modes were obtained. These data and models can be highly valuable for enhancing the quality of road traffic accident analysis.*

***Keywords:*** *Automotive dynamics, Acceleration, Hybrid vehicle performance, Regression analysis, accident reconstruction.*

## ВЪВЕДЕНИЕ

Динамиката на движение на автомобила е един от факторите, която е пряко свързана както с безопасността на движението по пътищата (Kodsi, S., & Muttart, J., 2010; Liang, X., et al., 2026), така и с автотехническата експертиза (Danaher, D., et al., 2020; Long, G., 2000; Wang, J., et al., 2004). В условията на интензивно градско движение конфликтните ситуации между превозните средства и други участници в движението – пешеходци, велосипедисти и други, възникват предимно в зоните на кръстовища, пешеходни пътеки и участъци за включване в главното движение. При настъпване на пътнотранспортно произшествие в такива зони, ключова задача пред съдебната автотехническа експертиза е прецизното възстановяване на механизма на произшествието. Това изисква определяне на различни кинематични параметри на автомобила: изминат път, време, ускорение и достигната скорост в определени моменти (например до мястото на удара).

Традиционните методики за автотехническа експертиза често разчитат на опростени математически модели, при които ускорението се приема за постоянна величина или се използват стойности, валидни за конвенционални автомобили с двигатели с вътрешно горене и механични предавателни кутии. В реални условия обаче ускорението при потегляне от място е променлив процес, зависещ пряко от характеристиките на силовия агрегат, типа на трансмисията и субективните действия на водача при превключване на предавките. Това налага провеждане на изследвания, свързани с динамиката на ускорение на автомобили с различно задвижване. Основната цел на настоящото изследване е да се извърши сравнителна оценка на динамиката на ускорение на

[4] Докладът е представен на пленарната сесия на 23 октомври 2026 г. в секция Sustainable and Intelligent Transport Systems, Technologies and Logistics, с оригинално заглавие на български език: *Сравнително Изследване На Динамиката На Ускорение При Хибридни И Конвенционални Превозни Средства*

автомобил с хибридно задвижване с автоматична трансмисия и автомобил с конвенционално бензиново задвижване с механична трансмисия при различни режими на ускорение.

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

През последните години в нашата страна се наблюдава бързо навлизане на автомобили с хибридно задвижване. Хибридните системи включват двигател с вътрешно горене и един или повече електрически мотора, захранвани от тягова батерия. Конструктивната специфика на хибридното задвижване осигурява максимален въртящ момент от електрическия двигател още от най-ниските обороти. В комбинация с автоматична безстепенна трансмисия e-CVT, хибридните автомобили реализират непрекъснат поток на мощност към задвижващите колела без прекъсвания за смяна на предавките. За разлика от тях, при автомобилите с конвенционално задвижване и механична предавателна кутия, кривата на ускорението съдържа характерни спадове по време на отделянето на съединителя и физическото превключване на предавките от водача. Това води до разлика в динамичния профил на ускорение при потегляне на къси разстояния, например в зоните на кръстовищата.

Ако при изготвяне на автотехническа експертиза за ПТП с участието на съвременен хибриден автомобил се използват остарели или конвенционални стойности за ускорението, изчисленията ще бъдат неточни. Това създава риск от погрешни правни и технически изводи относно скоростта на автомобила към момента на удара, опасната зона на спиране и техническата възможност за предотвратяване на ПТП. Поради тази причина възниква необходимостта от провеждането на сравнително изследване, което да установи реалните зависимости на ускорението спрямо изминатото разстояние при потегляне на автомобили.

Определянето на скоростта на автомобила в даден момент от траекторията при потегляне от място е основна задача при експертния анализ на ПТП. В класическата кинематика връзката между достигнатата скорост $V$, средното ускорение $a$ и изминатия път $S$ при потегляне се изразява чрез следната основна формула

$$V = \sqrt{2aS} \tag{1}$$

където $a$ е ускорението на автомобила; $S$ – изминатото разстояние.

Тази зависимост произлиза от основни уравнения при равноускорително движение. Изминатият път при потегляне от място се изразява като

$$S = \frac{at^2}{2} \tag{2}$$

Достигнатата скорост за време $t$ е

$$V = at \;\rightarrow\; t = V/a \tag{3}$$

Заместваики $t$ се получава

$$S = \frac{a\left(\frac{V}{a}\right)^2}{2} = \frac{V^2}{2a} \tag{4}$$

След преобразуване спрямо скоростта $V$, се получава изведеното уравнение (1).

Реалният процес на ускоряване при потегляне е нестационарен и ускорението варира спрямо разстоянието a = a(S), точната скорост в произволна точка $S_k$ при променливо ускорение се определя чрез интегралния израз

$$V(S_k) = \sqrt{2\int_0^{S_k} a\,(S)dS} \tag{5}$$

Когато ускорението се апроксимира с математическо уравнение - регресионен модел на база експерименталните данни за дискретните участъци, зависимост (5) позволява да се пресметне с

висока точност реалната скорост на автомобила без необходимост от допускане за постоянно ускорение.

За целите на изследването са използвани два леки автомобила (фиг. 1) с различен тип задвижваща система и трансмисия: Lexus NX300h, модел 2020 г., 145 kW, с хибридно задвижване, комбиниращо бензинов двигател с вътрешно горене и електрически мотор, с безстепенна автоматична предавателна кутия e-CVT и Fiat Stilo 1.6 16V с бензинов двигател с мощност, 76 kW, модел 2002 г., с 5-степенна механична предавателна кутия. Хибридният автомобил е с гуми Michelin Primacy 5 с размер 225/60 R18, а Fiat Stilo е с Kormoran Road Performance с размер 195/65 R15.

Експерименталните опити са проведени върху суха хоризонтална асфалтобетонна настилка на прав участък от пътя в две серии: при нормално потегляне (характерно за ежедневното градско движение) и при потегляне с максимално ускорение (при пълно натискане на педала на газта). За всеки автомобил и във всеки от двата режима са направени по 5 последователни повторения. Ускоренията са определяни на дискретни разстояния от мястото на тръгване (0-10 m, 0-20 m, 0-30 m и т.н.). Събраните данни са обработени в статистическата среда IBM SPSS.

За регистриране на ускорението на автомобилите е използвана специализирана измервателна система VBS20 SL Data Logger (Racelogic, 2026). Тя е оборудвана с високочувствителен GPS приемник (фиг. 1), осъществяващ запис на данните с честота от 20 Hz (20 измервания в секунда). Тази честота на опресняване гарантира висока точност и надеждност при регистриране на динамичните промени в ускорението и скоростта в преходните режими на потегляне. Системата има възможност да записва параметрите на движение посредством GPS и е широко използвана при определяне на различни характеристики на превозни средства (Balbuzanov T. 2023) Основните технически характеристики на използваната измервателна система включват: скорост, диапазон на измерване от 0,1 до 1609 km/h с разсейване от 0,1 km/h; изминато разстояние, точност 0,05% и разсейване 0,001 m; ускорение, обхват на измерване до 20 g, точност 0,05%, разсейване 0,01 g.



а) б)

Фиг. 1. Автомобили и оборудване VBS20 SL:
а) Lexus NX300h; б) Fiat Stilo.

Събраните данни са обработени с помощта на софтуера VBOX Tools, който предоставя три основни възможности за визуализация и анализ: графично представяне на регистрираните данни като функция на времето или изминатото разстояние; табличен вид на данните; и визуализация на траекторията на превозното средство.

Експерименталните данни са подредени в структурирана матрица от данни, съдържаща 140 наблюдавани случая и 5 основни променливи, формиращи масив от 700 отделни информационни полета. Матрицата обхваща последователни измервания за двата изследвани автомобила (хибриден Lexus NX300h и конвенционален Fiat Stilo 1,6), получени в два характерни режима на ускорение (стандартен „Normal“ и максимален „Max“) при 5 последователни опита за всеки режим на контролни разстояния от 10 до 70 m през стъпка от 10 m. За статистическата обработка, математическото моделиране и визуализацията на резултатите е използван специализираният софтуерен пакет IBM SPSS Statistics. Аналитичният подход включва последователно прилагане на описателна статистика за определяне на средните стойности на ускорението, последвано от регресионен анализ. Чрез него се съпоставят различни математически модели и се определят съответните коефициенти на детерминация $R^2$, с цел постигане на максимална точност при последващото изследване на автомобилни произшествия.

За оценка на динамиката на изменение на ускорението спрямо изминатото разстояние S е извършен регресионен анализ с три математически модела (линеен, квадратичен и кубичен).

Сравнителните статистически параметри и оценките на коефициентите за двата автомобила в двата режима на ускорение са представени в табл. 1.

Таблица 1. Регресионни модели и коефициенти за ускорението

| Dependent Variable: Ускорение, m/s$^2$; The independent variable is Разстояние, m. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Model Summary | | Parameter Estimates | | | |
| Автомобил | Режим | Equation | R Square | Sig. | Constant | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ |
| Lexus | Normal | Linear | ,705 | ,000 | 2,067 | -,005 | | |
| | | Quadratic | ,833 | | 2,208 | -,014 | ,000 | |
| | | Cubic | ,864 | | 2,336 | -,029 | ,001 | -3,556E-6 |
| | Max | Linear | ,853 | ,000 | 3,656 | -,008 | | |
| | | Quadratic | ,855 | | 3,681 | -,009 | 2,119E-5 | |
| | | Cubic | ,871 | | 3,547 | ,006 | ,000 | 3,722E-6 |
| Fiat | Normal | Linear | ,857 | ,000 | 1,327 | -,006 | | |
| | | Quadratic | ,868 | | 1,376 | -,009 | 4,024E-5 | |
| | | Cubic | ,880 | | 1,472 | -,020 | ,000 | -2,667E-6 |
| | Max | Linear | ,700 | ,000 | 2,212 | -,009 | | |
| | | Quadratic | ,871 | | 2,531 | -,031 | ,000 | |
| | | Cubic | ,935 | | 2,895 | -,072 | ,001 | -1,011E-5 |

Резултатите показват, че за всички изследвани модели равнището на статистическа значимост Sig. = 0,000 ($p < 0,001$), което потвърждава високата достоверност и адекватност на получените регресионни уравнения. Кубичният модел (Cubic) показва най-висок коефициент на детерминация при всички комбинации, Стойностите му са от 0,864 до 0,935 (т.е. описва 86 до 93% от промените на данните). Поради това кубичното уравнение $a(S) = b_0 + b_1S + b_2S^2 + b_3S^3$ в конкретния случай и от изследваните модели може да се приеме за описване на динамиката на ускоряване и за последващо използване в съдебната автотехническа експертиза.

При тези условия, уравненията за двата автомобила в двата режима на ускорение, имат следния вид:

1. Lexus NX300h – Режим „Normal“

$$a = 2{,}336 - 0{,}029\,S + 0{,}001S^2 - 3{,}556.10^{-6}S^3 \quad (6)$$

2. Lexus NX300h – Режим „Max“

$$a = 3{,}547 + 0{,}006\,S + 3{,}722\,.10^{-6}S^3 \quad (7)$$

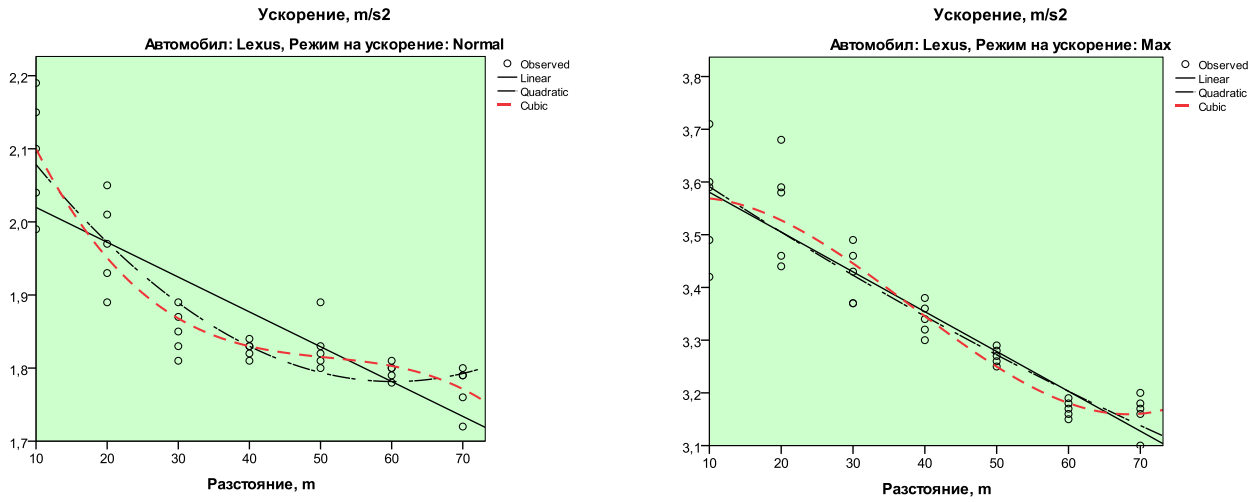
3. Fiat Stilo 1.6 – Режим „Normal“

$$a = 1{,}472 - 0{,}020\,S - 2{,}667\,.10^{-6}S^3 \quad (8)$$

4. Fiat Stilo 1.6 – Режим „Max“

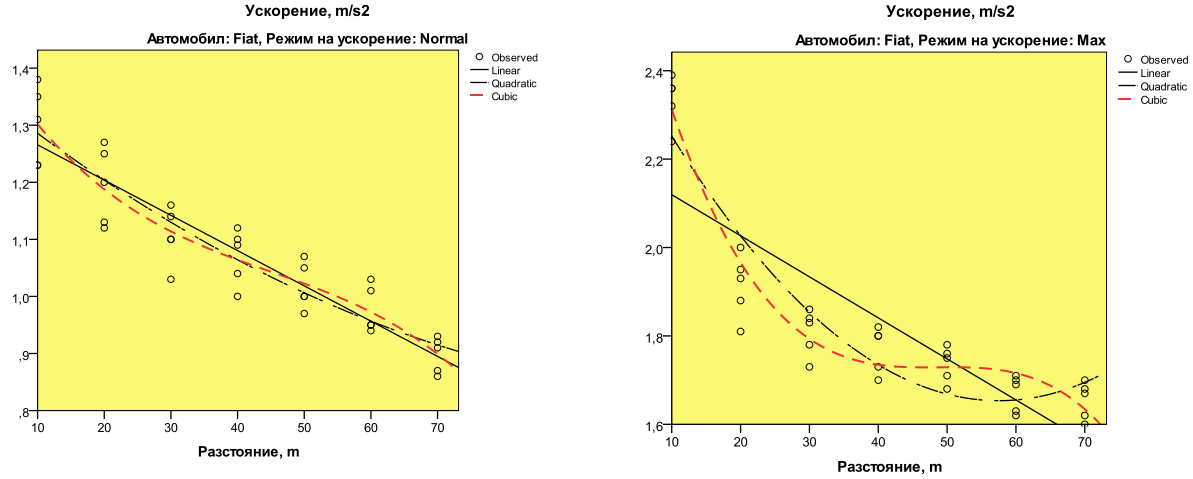
$$a = 2{,}895 - 0{,}072\,S + 0{,}001\,S^2 - 1{,}011.10^{-5}S^3 \quad (9)$$

Графично, резултатите са представени на фиг. 2 и 3.




а) б)

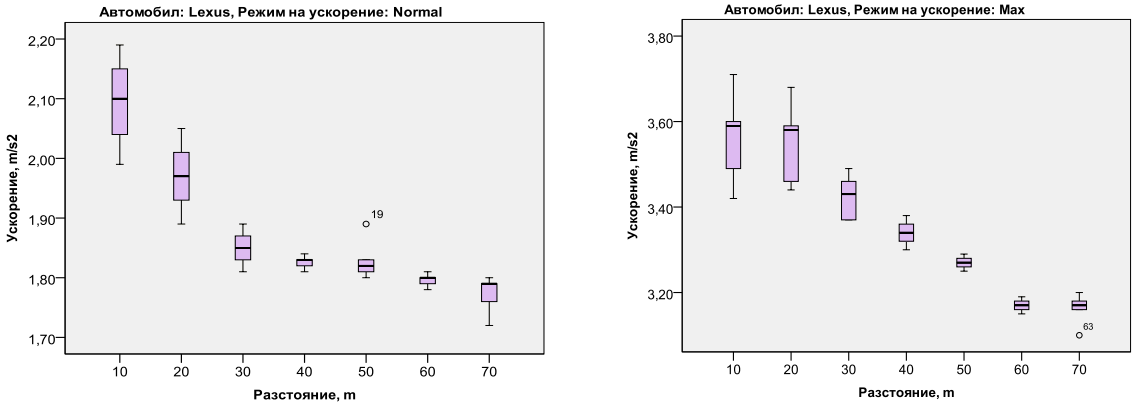
Фиг. 2. Регресионни модели за автомобил Lexus NX300h:
а) нормален режим на ускоряване; б) максимално ускоряване.



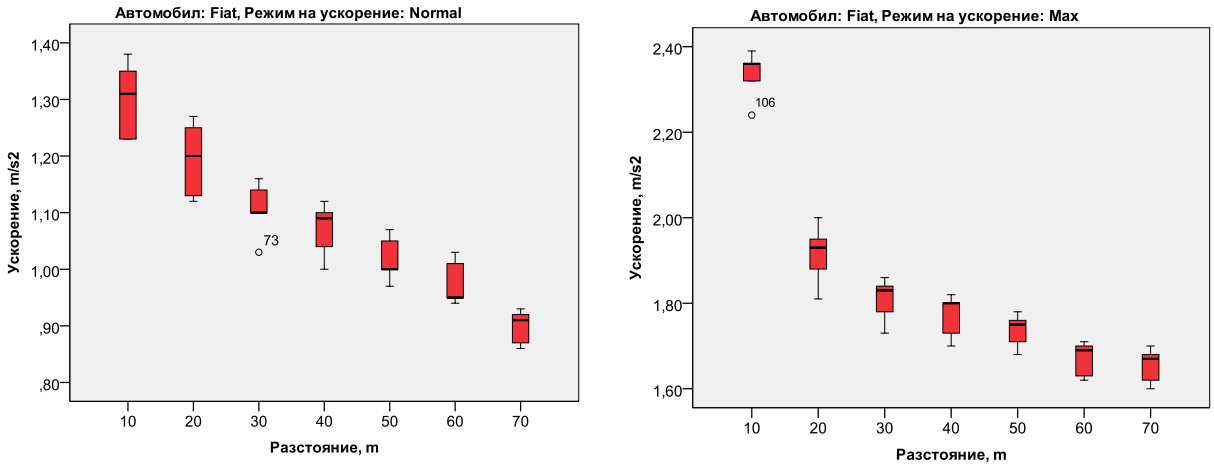

а) б)

Фиг. 3. Регресионни модели за автомобил Fiat Stilo:
а) нормален режим на ускоряване; б) максимално ускоряване.

За анализ на разпределението и дисперсията на експерименталните данни са построени диаграми тип Boxplot (фиг. 4 и 5).



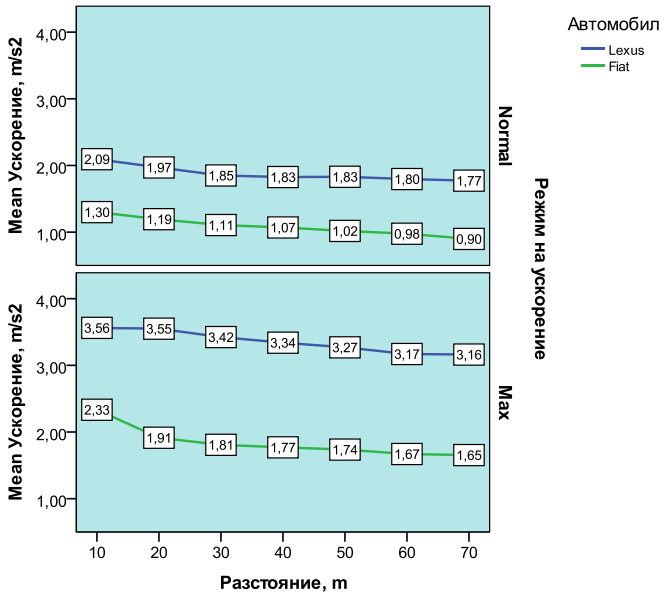

Фиг. 4. Boxplot диаграми за автомобил Lexus NX300h




Фиг. 5. Boxplot диаграми за автомобил Fiat Stilo

Тези диаграми предоставят данни за: медианата (средата на измерванията) - линия в средата на кутията; 25-и и 75-и персентил, където са 50% от всички измервания - горният и долният ръб на кутията; минималната и максималната стойност (без екстремните отклонения) - вертикалните отсечки; екстремни стойности (отклонения), който леко се разминава от останалите - кръгчетата с номера (например 19 при 50 m за автомобил Lexus NX300h). Диаграмите потвърждават стабилността на измерванията с много тесен интерквартилен обхват при всички разстояния. Наличието на единични отклонения не нарушава нормалното разпределение на данните и отразява реалните динамични смущения.

С получените експериментални данни е извършена статистическа обработка. За всяка от експерименталните групи е изчислена средната стойности на ускорението. Сравнителен анализ на средните стойности на ускорението между Lexus NX300h и Fiat Stilo за изследваните режими на ускоряване е представен на фиг. 6.




Фиг. 6. Средни стойности на ускорението за изследваните автомобили

Графичното представяне на средните стойности от експерименталните опити показва съществена разлика в динамичните характеристики на изследваните автомобили за конкретните разстояния. При режим нормално ускоряване за Lexus средното ускорение е в границите от 1,77 до

2,09 m/s$^2$, а при Fiat стойностите са от 0,90 до 1,30 m/s$^2$. В режима на максимално ускорение хибридното задвижване на Lexus постига начално ускорение от 3,56 m/s$^2$, докато за конвенционалният бензинов двигател и механична предавателна кутия на Fiat ускорението е 2,33 m/s$^2$. И при двата автомобила се наблюдава характерно плавно намаляване на ускорението с увеличаване на изминатото разстояние, което е по ясно изразено при Fiat.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведеното експериментално изследване е извършен количествен и статистически анализ на динамиката на ускорението при два конструктивно различни автомобила Lexus NX300h и Fiat Stilo 1.6 в режими на нормално и максимално ускорение. Изведените математически модели чрез кубична регресия показват висока точност при апроксимацията на експерименталните данни $R^2$ от 0,864 до 0,935, което потвърждава, че разстоянието е важен фактор, определящ изменението на средното ускорение. Нивото на статистическа значимост Sig. = 0,000 доказва, че установените разлики между автомобилите и режимите са значими, а не се дължат на случайни смущения по време на опитите.

Установява се съществена разлика в динамичните характеристики на изследваните автомобили. Хибридното задвижване на Lexus NX300h осигурява значително по-високи средни стойности на ускорението в сравнение с конвенционалния двигател с вътрешно горене на Fiat Stilo 1.6, особено при режима на максимално ускорение. За този режим средните стойности на ускорението за Lexus са в граници от 3,56 до 3,16 m/s$^2$ (11 % намаляване), а за Fiat – 2,33 до 1,65 m/s$^2$ (29 % намаляване). За анализ на разпределението и дисперсията на експерименталните данни са генерирани диаграми тип Boxplot, които потвърждават стабилността на измерванията при всички разстояния.

## REFERENCES

Danaher, D., Donaldson, A., & McDonough, S. (2020). *Acceleration of Left Turning Heavy Trucks*. SAE Technical Paper. 2020-01-0882, 2020.

Lyubenov D., T. Balbuzanov, O. Dinolov (2022). Application of GPS-based information system in studying dynamic properties of vehicles International Scientific Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems, , 1-6, doi: 10.1063/5.0100026

Kodsi, S., & Muttart, J. (2010). *Modeling Passenger Vehicle Acceleration Profiles from Naturalistic Observations and Driver Testing at Two-way-stop Controlled Intersections*. SAE Technical Paper, 2010-01-0062.

Liang, X., Ding, J., & Zheng, L. (2026). *A safety field-based surrogate measure for quantifying bikelane conflict risk considering physical and behavioral dynamics*. Accident Analysis and Prevention, DOI: 10.1016/j.aap.2026.108627.

Long, G. (2000). *Acceleration Characteristics of Starting Vehicles*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies. TRR 1737.

Wang, J., et al. (2004). *Normal Acceleration Behavior of Passenger Vehicles Starting from Rest at All-Way-stopControlled Intersections*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, pp. 158-166. Transportation Research Record 1883.

Racelogic. (2026). *VBOX IISL 20 Hz Overview*. Racelogic Support Centre. https://racelogic.support/automotive/discontinued-legacy/data-loggers/vbox-ii-range/vbox-iisl-20-hz/overview/