

نموذج مؤسسة RAND لسلامة المركبات الممكنة

توثيق النموذج

نيدي كالرا (Nidhi Kalra) وديفيد جي جروفز (David G. Groves)





نموذج مؤسسة RAND لسلامة المركبات الممكنة توثيق النموذج

نيدي كالرا (Nidhi Kalra) وديفيد جي جروفز (David G. Groves)

للحصول على مزيد من المعلومات حول هذا المنشور، الرجاء زيارة الموقع الإلكتروني

www.rand.org/t/RR1902

تم النشر بواسطة مؤسسة RAND، سانفا مونيك، كاليفورنيا.
© حقوق الطبع والنشر لعام 2017 محفوظة لصالح مؤسسة RAND
® RAND علامة تجارية مسجلة.

حقوق الطبع والنشر الإلكتروني محدودة

هذه الوثيقة والعلامة (العلامات) التجارية الواردة فيها محمية بموجب القانون. يتوفر هذا التمثيل للملكية الفكرية الخاصة بمؤسسة RAND للاستخدام لأغراض غير تجارية حصريًا. يحظر النشر غير المصرح به لهذا المنشور عبر الإنترنت. يُصرح بنسخ هذه الوثيقة للاستخدام الشخصي فقط. شريطة أن تظل مكتملة دون إجراء أي تعديل عليها. يلزم الحصول على تصريح من مؤسسة RAND لإعادة إنتاج أو إعادة استخدام أي من الوثائق البحثية الخاصة بنا. بأي شكل كان، لأغراض تجارية. للمزيد من المعلومات حول تصاريح إعادة الطباعة والربط على المواقع الإلكترونية، الرجاء زيارة صفحة التصاريح في موقعنا الإلكتروني www.rand.org/pubs/permissions.

مؤسسة RAND هي منظمة بحثية تُعدّ حلولاً لتحديات السياسات العامة للمساهمة في جعل المجتمعات حول العالم أكثر أمانًا، وسلامة، وصحة وازدهارًا. مؤسسة RAND هي مؤسسة غير ربحية، حيادية، وملتزمة بالصالح العام.

لا تعكس منشورات مؤسسة RAND بالضرورة آراء عملاء ورعاة الأبحاث الذين يتعاملون معها.

ادعم RAND

وتبرع بمساهمة خيرية معفاة من الضريبة من خلال
www.rand.org/giving/contribute

www.rand.org

www.rand.org/randeurope

تمتلك مؤسسة RAND تاريخًا طويلًا من الأبحاث على الأنظمة الذكية. فمنذ خمسينيات القرن العشرين. وبالعامل على أجهزة الكمبيوتر المصممة للعب الشطرنج وآلة النظرية المنطقية. أصدرت مؤسسة RAND أبحاثًا موضوعية وقائمة على الأدلة للمساعدة في تعريف المجتمع بكيفية الاستفادة من المنافع وإدارة مخاطر التقنيات الذكية التحويلية. ويقوم عمل مؤسسة RAND على المركبات عالية المكننة على هذا الأساس المتناسك. بَحَثَ مقال (المسؤولية والتنظيم المتعلقان بتقنيات المركبات المستقلة (ذاتية القيادة) "Liability and Regulation of Autonomous Vehicle Technologies") المنشور في 2009 والدراسة الرئيسية (تقنية المركبة المستقلة (ذاتية القيادة): *Autonomous Vehicle Technology* دليل لصانعي السياسات الصادرة في 2014 (وخضعت للمراجعة في 2016) مشهد السياسات المحيط بهذه التقنيات. حددت الدراسة الصادرة في 2016 القيادة الآمنة: كم عدد الأميال التي ستقطعها المركبات المستقلة لتثبت موثوقيتها؟ إذا ما كان ممكنًا وعمليًا تجربة المركبات عالية المكننة كطريقة لتقييم درجة سلامتها.

تواصل هذه الدراسة مسار البحث بشأن سلامة المركبات عالية المكننة. وفي ظل تطور التكنولوجيا. يجب على صانعي السياسات دراسة الطرق التي ستشكل بها الخيارات على المدى القريب بشأن سياسات المركبات عالية المكننة مستقبل السلامة على الطرق مع الوقت. تساعد هذه الدراسة على التعريف بمناقشات السياسات. حيث تصف نموذجًا استكشافيًا (نموذج مؤسسة RAND لسلامة المركبات المكننة أو MAVS) يقدّر عدد حالات الوفاة المتوقعة كل عام في مستقبل سيشهد استخدام المركبات عالية المكننة أو بدونها. في ظل فرضية المستخدم لمجموعة من العوامل. يمكن أن تساعد الأفكار المستخلصة من النموذج المستخدم في التفكير بشأن كيفية تشكيل السياسات لهذه العوامل: لتحسين السلامة في الوقت الحالي ومع مرور الوقت. استُخدم هذا النموذج. على وجه الخصوص. في الدراسة الصادرة في 2017: *The Enemy of Good: Estimating the Cost of Waiting for Nearly Perfect Automated Vehicles* (السعي نحو الكمال: تقدير كلفة الانتظار إلى حين تطوير مركبات آلية شبه مثالية) لتقييم درجة السلامة التي يجب أن تكون عليها المركبات عالية المكننة قبل ترخيصها على الطرق للاستخدام الاستهلاكي.

برنامج مؤسسة RAND للعلوم والتكنولوجيا والسياسات

أُجري هذا البحث في برنامج مؤسسة RAND للعلوم والتكنولوجيا والسياسات. الذي يركز في المقام الأول على دور التطور العلمي والابتكار التقني في السلوك الإنساني. وصناعة القرارات على الصعيدين العالمي والإقليمي؛ حيث يرتبط بالعلوم والتكنولوجيا والآثار المترتبة للعلوم والتكنولوجيا على تحليل السياسات وخيارات السياسات.

يُعد هذا البرنامج جزءًا من قسم العدل والبنية التحتية والبيئة. وهو قسم من أقسام مؤسسة RAND مُخصص لتحسين صنع القرارات والسياسات عبر مجموعة كبيرة من مجالات السياسات: تشمل العدالة المدنية والجنائية، وتطوير البنية التحتية وتمويلها. والسياسة البيئية. وتقنية النقل وتخطيطه. والهجرة وحماية الحدود. والسلامة العامة والمهنية. وسياسة الطاقة. وسياسة الابتكار والعلوم. والفضاء. والاتصالات السلكية واللاسلكية.

وفي أثناء إعداد هذه الدراسة وفي وقت نشرها. شغل زوج المؤلف المشارك نيدي كالرا منصب المؤسس المشارك ورئيس شركة Nuro؛ وهي شركة ناشئة في مجال التعليم الآلي والروبوتات متخصصة في مجال تطوير المركبات المستقلة. وقد شغل سابقًا منصب المهندس الرئيسي لمشروع سيارة غوغل ذاتية القيادة. ولم يكن لزوج كالرا أو الشركات التي عمل بها أي تأثير على هذه الدراسة.

يجب إرسال الاستفسارات أو التعليقات بخصوص هذه الدراسة إلى مسؤولة المشروع نيدي كالرا (Nidhi_Kalra@rand.org). للحصول على مزيدٍ من المعلومات عن برنامج العلوم والتكنولوجيا والسياسات من مؤسسة RAND، تفضل بزيارة الموقع الإلكتروني www.rand.org/jie/stp أو تفضل بالاتصال على المدير على البريد الإلكتروني stp@rand.org.

مشروع RAND Ventures

مؤسسة RAND هي منظمة بحثية تُعدّ حلولاً لتحديات السياسات العامة للمساهمة في جعل المجتمعات حول العالم أكثر أمانًا وسلامة، وصحة وازدهارًا. ومؤسسة RAND هي مؤسسة غير ربحية، حيادية، وملتزمة بالصالح العام. يشكّل مشروع RAND Ventures وسيلة للاستثمار في حلول السياسات، تدعم الإسهامات الخيرية قدرتنا على وضع وجهات النظر في عين الاعتبار، ومعالجة المواضيع الصعبة وغالبًا المثيرة للجدل، ومشاركة نتائجنا المستخلصة بطرق مبتكرة ومقنعة. تعتمد نتائج وتوصيات بحوث مؤسسة RAND على البيانات والأدلة، ومن ثم لا تعكس بالضرورة تفضيلات أو مصالح السياسات لعملائها أو جهاتها المانحة أو داعميها.

أسهمت مؤسسة Zwick Impact Fund جزئيًا في خروج هذا المشروع إلى النور. زوّد تشارلز زويك (Charles Zwick)، الذي عمل باحثًا في مؤسسة RAND من عام 1956 حتى 1965 وشغل لاحقًا منصب عضو بمجلس الأمناء وعضو استشاري بمجلس الأمناء، مشروعات مؤسسة RAND بمبلغ مليون دولار، وبالتكلفة المطلوبة للبدء في مواجهة تحديات السياسات الجديدة والمستجدة ودعم المواهب البارزة في تركيزها على هذه القضايا، يعتمد رئيس مؤسسة RAND على هذه المنحة السخية كل عام في مساعدة فرق البحث والتواصل في توسيع نطاق تأثير الأبحاث المنجزة.

يحصل هذا المشروع على دعم أيضًا، بشكل جزئي، من الدخل المكتسب من الأبحاث الممولة من العملاء والمساهمات السخية للمجلس الاستشاري للعدل والبنية التحتية والبيئة التابع لمؤسسة RAND.

المحتويات

iii	تمهيد
vi	الأشكال
vi	الجداول
vii	الملخص
ix	شكر وعرفان
x	الاختصارات
الفصل الأول	
1	مقدمة
الفصل الثاني	
5	التعريفات ووضع إطار للمشكلات
5	ما هي المركبة عالية المكننة وما هي المركبة غير عالية المكننة؟
7	كيف نعرّف مستقبلاً يشهد استخدام المركبات عالية المكننة ومستقبلاً بدونها؟
7	كيف نقيس السلامة على الطرق؟
11	كيف تم تقييم السلامة على الطرق بالمستقبل في الدراسات السابقة؟
الفصل الثالث	
13	نمذجة السلامة في مستقبل بدون المركبات عالية المكننة
13	معدلات السلامة المستقبلية للمركبات الآلية غير عالية المكننة
14	معدل سلامة المركبات غير عالية المكننة بمرور الوقت
15	معدل أمان المركبات عالية المكننة بمرور الوقت
الفصل الرابع	
17	نمذجة السلامة في مستقبل بمركبات عالية المكننة
17	عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة وغير عالية المكننة بمرور الوقت
21	معدل سلامة المركبات غير عالية المكننة بمرور الوقت
21	معدل سلامة المركبات عالية المكننة بمرور الوقت
21	التغيير في أحدث تقنيات السلامة في المركبات عالية المكننة
24	انتشار أحدث التقنيات في سلامة المركبات عالية المكننة
الفصل الخامس	
29	استكشاف النموذج وتوضيحه
الفصل السادس	
33	ملخص ونتائج النموذج
الملاحق	
35	الملحق A. نمذجة الانتشار باستخدام دالة لوجستية
37	الملحق B. نمذجة التعليم بدالة اضمحلال أسّي
39	المراجع

الأشكال

- الشكل 2.1. عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في الولايات المتحدة. حسب العام.....8
- الشكل 2.2. الوفيات على الطرق ومعدلات الوفاة في الولايات المتحدة. حسب العام.....9
- الشكل 2.3. معدلات الإصابة وحوادث الإصابات على الطرق المُبلَّغ عنها في الولايات المتحدة. حسب العام.....10
- الشكل 2.4. معدلات الاصطدام وحوادث الاصطدام المُبلَّغ عنها في الولايات المتحدة. حسب العام.....10
- الشكل 3.1. العدد السابق للأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة.
وسيناريوهان للعدد المستقبلي للأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة.....14
- الشكل 3.2. معدلات الوفاة السابقة وسيناريوهان لمعدلات الوفاة في المستقبل.....15
- الشكل 3.3. الوفيات السنوية السابقة وسيناريوهان للوفيات السنوية في المستقبل.....16
- الشكل 4.1. سيناريو النسبة المئوية للأميال خط الأساس التي ستقطعها
المركبات عالية المكننة في المستقبل.....19
- الشكل 4.2. سيناريو عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة وغير عالية المكننة.....20
- الشكل 4.3. سيناريو معدل الوفاة النسبي للمركبات عالية المكننة كدالة للأميال
التراكمية المقطوعة بمركبات عالية المكننة.....23
- الشكل 4.4. سيناريو معدل الوفاة النسبي للمركبات عالية المكننة والأميال
التراكمية المقطوعة بمركبات عالية المكننة بمرور الوقت.....24
- الشكل 4.5. الوفيات الناجمة عن المركبات عالية المكننة مع التحسين المثالي أو بدون تحسين للأسطول.....26
- الشكل 4.6. إجمالي الوفيات في مستقبل توجد به مركبات عالية المكننة.....27
- الشكل 5.1. عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة في ثلاثة سيناريوهات.....31
- الشكل 5.2. أحدث معدل للوفيات الناجمة عن المركبات عالية المكننة
نسبة إلى معدل المعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية في ثلاثة سيناريوهات.....31
- الشكل 5.3. الوفيات السنوية في مستقبل خط أساس بدون المركبات عالية المكننة وفي ثلاثة سيناريوهات للمركبات
عالية المكننة.....32

الجداول

- الجدول 2.1. مستويات مكننة القيادة التي وضعتها جمعية مهندسي السيارات الدولية.....6
- الجدول 5.1. المعلومات في ثلاثة سيناريوهات لمركبة عالية المكننة.....29

تمثل سلامة المركبات عالية المكننة اهتمامًا رئيسيًا لدى قطاع النقل وصانعي السياسات والعامّة. ويُركّز الجزء الأكبر من الاهتمام على درجة السلامة التي يجب أن تكون عليها المركبات عالية المكننة قبل الترخيص باستخدامها على الطريق لاستخدام المستهلكين. ويمثل الوقوف على هذا الأمر أهمية؛ لأنه سيشكل توقيت وكيفية طرح المركبات عالية المكننة في السوق. إلا أن سلامة المركبات عالية المكننة عند طرحها لا تعتبر إلا جزءًا فقط من الصورة، ويجب استكمالها بالسؤال عن درجة السلامة التي ستكون عليها المركبات عالية المكننة بمرور الوقت، وكيف يمكن أن تشكل خيارات السياسات الموضوعية حاليًا ومستقبلًا السلامة على الطريق.

لا بد من مراعاة السلامة مع مرور الوقت لعدة أسباب. أولاً؛ لأن تأثير المركبات عالية المكننة على سلامة الطرق سيكون أكبر في المستقبل منه في هذه الأيام لزيادة عدد الأفراد الذين سيفتقنون هذه المركبات مع مرور الوقت. ثانيًا؛ لأن سلامة المركبات عالية المكننة ستشهد تحسناً مع مرور الوقت من خلال التعلم والتطوير المستمر. ستشكل الخيارات على المدى القريب المتعلقة بوقت طرح المركبات عالية المكننة درجة السلامة التي ستكون عليها المركبات في المستقبل ومدى السرعة التي ستشهد بها تحسناً في هذه المركبات. ثالثًا؛ لأنه يُتوقع أن تشهد المركبات عالية المكننة تزايدًا في الطلب للتنقل لأنها ستحد من تكلفة القيادة. لذلك حتى مع تحسن درجة سلامة المركبات عالية المكننة، فقد يقابل انخفاض معدل الوفيات، على سبيل المثال، نموًا في نسبة السفر. رابعًا؛ لأن الأداء المستقبلي للمركبات عالية المكننة يُقارن عادةً بالأداء الحالي للسائق البشري. وإن كان هذا معيارًا متغيرًا. وبدون مراعاة هذه التغيرات المحتملة في درجة السلامة بين المركبات عالية المكننة بمرور الوقت، لن تكون هذه المقارنات مكتملة.

الأثار المهمة بعيدة المدى لتوقيت طرح المركبات عالية المكننة، ومعدل انتشارها، وتحسينها مع مرور الوقت، والتغيرات في درجة سلامة المركبات غير عالية المكننة هي آثار غير ملحوظة بشكل كبير عندما ينحصر الحديث بشأن السلامة على الحاضر فحسب. ولإتاحة نقاشات لمراعاة عامل السلامة على المدى البعيد، وضعنا نموذجًا بسيطًا للطريقة التي قد تتفاعل بها هذه العوامل وتسفر عن نتائج مختلفة بشأن السلامة مع مرور الوقت.

والأهم من ذلك، أن نموذج سلامة المركبات المُمكنة لا يتنبأ بسرعة الانتشار المستقبلي أو معدل التعلم بالمركبات عالية المكننة. كما لا يتنبأ بدرجة السلامة التي ستتطور بين المركبات غير عالية المكننة. يتسم التنبؤ المستقبلي بالانتشار التكنولوجي والسلوك البشري والتفاعلات المستقبلية للتكنولوجيا الحديثة في أوساط النقل في العالم الحقيقي بعد عقود في المستقبل بصعوبة بالغة، وأي تنبؤ من هذا القبيل يُحتمل أن يكون خطأً. إضافةً إلى ذلك، فإن هذه التنبؤات قد لا تقدم الرؤى اللازمة بشأن ما سيقود إلى النتائج الواعدة، وبشأن الكيفية التي قد تعزز بها السياسات هذه النتائج.

في المقابل، بالنظر إلى فرضية أو سيناريو المستخدم بشأن العوامل الرئيسية، يقدّر نموذج المركبات المُمكنة نتائج السلامة في مستقبل بمركبات عالية المكننة وبدونها. ومن شأن هذا أن يساعد المستخدمين في استكشاف كيف تؤدي الافتراضات المتباينة إلى نتائج مختلفة، وما هي العوامل التي قد تؤدي إلى درجة سلامة أكبر أو أقل. يمكن أن تساعد هذه الرؤى صانعي السياسات والجمهور على فهم الكيفية التي يمكن أن تشكل بها السياسات هذه العوامل لتحسين درجة السلامة، كما يمكن أن يقدم النموذج رؤى بشأن كيفية موازنة درجة السلامة بالمركبات عالية المكننة عند موعد طرح، والهدف من تحسين السلامة مع مرور الوقت. استُخدم هذا النموذج، على وجه الخصوص، في الدراسة *The Enemy of Good: "Estimating the Cost of Waiting for Nearly Perfect Automated Vehicles"* (كارلا وجروفز، 2017) لتقييم درجة السلامة التي يجب أن تكون عليها المركبات عالية المكننة قبل ترخيصها على الطريق لاستخدام المستهلكين.

توثق هذه الدراسة نموذج سلامة المركبات المُمكنة. يقدّر النموذج الكيفية التي يمكن بها للمركبات عالية المكننة تحسين درجة السلامة على الطرق أو زيادتها سوءاً (قياساً بمعدل الوفيات أو الإصابات أو حوادث الاصطدام أو غيرها من المقاييس) مع مرور الوقت، بناءً على الافتراضات التالية المحددة من المستخدم بشأن المركبات غير عالية المكننة والمركبات عالية المكننة:

- التغيير في الطلب على الانتقال في المستقبل بدون مركبات عالية المكننة
- التغيير في أداء السلامة للمركبات غير عالية المكننة. بما في ذلك سمات مثل أنظمة مساعدة السائق المتقدمة التي توفر بعض الوظائف المُمكنة
- توقيت طرح المركبات عالية المكننة بالسوق، ومعدل ومستوى انتشارها واستخدامها مع مرور الوقت
- أداء السلامة للمركبات عالية المكننة عند توقيت الطرح، ومعدل التحسين في السلامة كدالة للأهم المقطوعة، وأقصى أداء ممكن للسلامة
- قابلية الترقية لأسطول المركبات عالية المكننة الحالي لمواكبة أحدث التطورات في أداء المركبات عالية المكننة. وانطلاقاً من هذه العوامل، تستخدم المركبات عالية المكننة تصورات بسيطة للانتشار التكنولوجي، وتعلم تقدير نتائج السلامة كل عام في مستقبل بمركبات عالية المكننة وبدونها. هذا النموذج غير معد ليضم جميع العوامل والعلاقات المعقدة التي يمكن أن تشكل سلامة المركبات عالية المكننة؛ لأن القيام بذلك قد يؤدي إلى تشابك النموذج، والتشويش على العوامل الرئيسية التي تدفع السلامة بدون الحاجة إلى إدراج عامل الدقة (لأن تلك العوامل غير واضحة أيضاً إلى حد بعيد). وإنما يُقصد من هذا النموذج أن يكون أساساً للاستكشاف الذي يَمكّن المستخدمين من توسيع إدراكهم لسلامة المركبات عالية المكننة من الطرح وبمرور الوقت.

شكر وعرفان

نود أن نشكر أنيتا تشاندرا (Anita Chandra) ومارجوري بلومينثال (Marjory Blumenthal) وجيمس أندرسون (James Anderson) على مشورتهم ودعمهم منذ بداية هذا العمل. ونحن ممتنون أشد الامتنان لكينيث كوون (Kenneth Kuhn) بمؤسسة RAND وكارا كوكلمن (Kara Kockelman) بجامعة تكساس لمراجعاتهما. كما نتوجه بالشكر إلى تشارليز زويك (Charles Zwick) لدعمه الكريم لمؤسسة RAND من خلال Zwick Impact Awards، التي بدونها لم يكن لهذه الدراسة والمواد المتعلقة بها أن تخرج إلى النور.

الاختصارات

نظام مساعدة السائق المتقدم	ADAS
نظام القيادة المُمكنة	ADS
وظيفة القيادة الديناميكية	DDT
مركبة عالية المكننة	HAV
نموذج مؤسسة RAND لسلامة المركبات المُمكنة	MAVS
الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة	NHTSA
مجال التصميم التشغيلي	ODD
الأميال المقطوعة بالمركبة	VMT

تمثل حوادث اصطدام المركبات الآلية أزمة صحية عامة في الولايات المتحدة وفي أنحاء العالم. لقي 35,092 شخص حتفهم، في 2015 جراء حوادث اصطدام في الولايات المتحدة، بمعدل زيادة 7.2 بالمئة عن عام 2014، وأصيب 2.44 مليون شخص، بمعدل زيادة تصل إلى 4.5 بالمئة عن عام 2014 (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة 2016a). وكان عام 2016 الأكثر قسوة، إذ بلغ معدل الوفيات 37,461 (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2017). يمكن أن تفرض حوادث المركبات الآلية بالولايات المتحدة تكاليف اقتصادية واجتماعية تتجاوز 800 مليار دولار أمريكي في سنة واحدة (Blincoe et al., 2015). علاوةً على ذلك، ينطوي أكثر من 90 بالمئة من حوادث الاصطدام على أخطاء بشرية (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2008)، مثل القيادة بسرعة متهورة، والخطأ في تقدير سلوكيات السائقين الآخرين، فضلاً عن التشنت والتعب والضعف الناتج عن تأثير الكحول.

يتطلع الكثير إلى المركبات عالية المكننة، المركبات ذاتية القيادة لمدة من الوقت أو على الدوام، للتخفيف من هذه الأزمة¹. ولكن يوجد اعتراف بأن هذه التقنية قد تفرض، أيضاً، مخاطر على السلامة. تمثل سلامة المركبات عالية المكننة اهتماماً رئيسياً لدى قطاع النقل وصانعي السياسة والعامّة². ويركّز الجزء الأكبر من الاهتمام على درجة السلامة التي يجب أن تكون عليها المركبات عالية المكننة قبل الترخيص باستخدامها على الطريق لاستخدام المستهلكين. ويمثل الوقوف على هذا الأمر أهمية؛ لأنه سيشكل توقيت وكيفية طرح المركبات عالية المكننة في السوق. ومع ذلك، فإنه لمناقشة هذه المسألة كما ينبغي، يتعين على أصحاب المصلحة التساؤل عن مدى درجة السلامة التي ستصبح عليها المركبات عالية المكننة بمرور الوقت، وكيفية تشكيل خيارات السياسات الموضوعية حالياً للسلامة على الطرق في المستقبل.

لا بد من مراعاة السلامة مع مرور الوقت لعدة أسباب. أولها، سيكون تأثير المركبات عالية المكننة على سلامة الطريق أكثر أهمية في المستقبل عنه في هذه الأيام، نظرًا إلى أن الانتشار واسع النطاق لأي تقنية يستغرق وقتًا في الأساس. وهذا ينطبق على وجه التحديد على تقنيات السيارات؛ حيث يمكن أن يستغرق معدل دوران الأسطول عقودًا من الزمن (Litman, 2017). لذا، فحتى إذا كانت المركبات عالية المكننة آمنة أو غير آمنة في السنوات الأولى، فسيكون الفارق الفعلي الذي تحدثه على سلامة الطرق عمومًا محدودًا جدًا. وسيكون التأثير أكبر بعد سنوات من الآن. عندما يستخدم العديد من الأفراد المركبات عالية المكننة.

ثانيها، أنه من المتوقع أن تشهد سلامة المركبات عالية المكننة تحسّنًا مع مرور الوقت (Kalra, 2015; Musk, 2017). تستند خوارزميات التعلم الآلي، التي تنظم تصور المركبات عالية المكننة وصناعة القرار والتنفيذ إلى حد كبير، إلى تجربة القيادة لإدخال تحسينات، ولذلك، كلما زادت (واختلفت) الأميال التي تقطعها المركبات عالية المكننة، زادت إمكانية التحسين في أحدث أداء للسلامة بالمركبات عالية المكننة. ما يعني أن خيارات المدى القريب المتعلقة بتوقيت طرح المركبات عالية المكننة ستشكل كذلك درجة السلامة التي ستكون عليها في المستقبل، ومدى السرعة التي ستتم بها التحسينات. على سبيل المثال، فإن السياسة التي تتطلب أن تكون المركبات عالية المكننة في حالة شبه كاملة

¹ نستخدم مصطلح المركبات عالية المكننة للإشارة إلى المركبات التي تندرج تحت المستويات 3 أو 4 أو 5 في تصنيف المركبات المُمكنة بجمعية مهندسي السيارات الدولية (جمعية مهندسي السيارات الدولية، 2016). نتناول هذا التعريف وغيره من التعريفات بالتفصيل، ونناقش الاختلافات بين المصطلحات في الفصل الثاني.

² على سبيل المثال، عقد الكونجرس العديد من جلسات الاستماع بشأن المركبات عالية المكننة، وتمثل سلامة المركبات عالية المكننة أولوية ثابتة في البيانات الصادرة من صانعي السياسات. انظر، على سبيل المثال، Walden (2017) وCollins (2016).

قبل أن تُطلق على الطرق يمكن أن تمنعها بالفعل من تحقيق حالة شبه الكمال في أي إطار زمني عملي؛ لأنها ستحرمها من تجربة القيادة الضرورية للوصول إلى هذا المستوى من الأداء. ومع ذلك، فإنه لو أطلقت المركبات عالية المكننة على الطريق، حتى في ظل وجود مخاوف أمان في الأجل القريب على نطاق واسع أو أن التكنولوجيا غير آمنة بشكل جلي، فربما يوجد مجال صغير متاح لطرح التكنولوجيا بالسوق. قد يطالب الجمهور برفع المركبات عالية المكننة من الطريق، ما ينجم عنه انتشار أكثر بطئاً وتأخير في الحصول على التجربة اللازمة لتحسين الأداء.

ثالثها، أنه من المتوقع أن يتزايد الطلب على الانتقال بالمركبات عالية المكننة؛ حيث إنها ستقلل من تكلفة القيادة (Anderson et al., 2016; Fagnant and Kockelman, 2015). ولذلك، حتى مع تحسن سلامة المركبات عالية المكننة، فقد تتساوى تأثيرات انخفاض معدل الاصطدام بتزايد الانتقال. وليس هذا عيباً في حد ذاته، حيث تُظهر أن الأفراد بإمكانهم التنقل بشكل أكبر، وهو ما ينطوي على قيمة اقتصادية واجتماعية كبيرة، بمخاطرة أقل. غير أن الحديث عن إنقاذ الأرواح والحد من الإصابات وتجنب الحوادث غير مكتمل ما لم يُدرج عامل الزيادة في الانتقال بهذه المركبات.

رابعها، لأن الأداء المستقبلي للمركبات عالية المكننة يُقارن عادةً بالأداء الحالي للسائق البشري. وفي الوقت الذي تُعد فيه سلامة السائق البشري معياراً طبيعياً، إلا أنه معيار متغير (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a). وعلى الجانب الآخر، يمكن لتطبيقات الترفيه والمعلومات، سواء المدمجة في المركبة أو على الأجهزة المحمولة للمستخدمين، أن تزيد معدلات القيادة المشتتة والاصطدام، وعلى الجانب الآخر، يمكن أن تُعوّض أنظمة مساعدة السائق المتقدمة عن الأمان وتُحسّنه، وهو ما يترتب عليه تقليل حوادث الاصطدام. وستكون هذه المقارنات غير مكتملة بدون الأخذ في الاعتبار التغيرات المحتملة بمرور الوقت في أداء السلامة بين المركبات غير عالية المكننة.

الأثار المهمة بعيدة المدى لتوقيت طرح المركبات عالية المكننة، ومعدل انتشارها، وتحسينها مع مرور الوقت، والتغيرات في درجة سلامة المركبات غير عالية المكننة هي آثار غير ملحوظة بشكل كبير عندما ينحصر الحديث بشأن السلامة على الحاضر فحسب. لقد وضعنا نموذجاً بسيطاً للطريقة التي قد تتفاعل بها هذه العوامل ويترتب عليها نتائج مختلفة بشأن السلامة على الطرق مع مرور الوقت؛ سعياً لإثارة نقاشات تتضمن النظر في الأمان على المدى البعيد.

ومن المهم الانتباه إلى أن نموذج سلامة المركبات المكننة لا يتنبأ بوتيرة انتشار المركبات عالية المكننة في المستقبل، أو معدل التعلم من تجربتها، أو درجة تطور السلامة بين المركبات غير عالية المكننة. يتسم التنبؤ المستقبلي بالانتشار التكنولوجي والسلوك البشري والتفاعلات المستقبلية للتكنولوجيا الحديثة في أوساط النقل في العالم الحقيقي بعد عقود في المستقبل بصعوبة بالغة، وأي تنبؤ من هذا القبيل يُحتمل أن يكون خطأً. كما أن هذه التنبؤات قد لا تقدم الرؤى اللازمة حول ما سيقود إلى درجة سلامة أكبر، وكيف ترتقي السياسات بمستوى السلامة إلى الأفضل.

وبدلاً من ذلك، يقدر نموذج سلامة المركبات المكننة طريقة مقارنة السلامة في المستقبل مع المركبات عالية المكننة وبدونها، وذلك بالنظر إلى تصوّر المستخدم لتلك العوامل الرئيسية. ومن شأن هذا أن يساعد المستخدمين على استكشاف كيف تؤدي الافتراضات المتباينة إلى نتائج مختلفة، وما هي العوامل التي قد تؤدي إلى درجة سلامة أكبر أو أقل. يمكن أن تساعد هذه الرؤى صانعي السياسات والعامّة على النظر في الطريقة التي يمكن أن تُشكّل بها هذه السياسات تلك العوامل لتحسين الأمان. كما يمكن أن يقدم النموذج رؤى بشأن كيفية موازنة درجة السلامة بالمركبات عالية المكننة عند موعد الطرح، والهدف من تحسين السلامة مع مرور الوقت.

توثق هذه الدراسة نموذج سلامة المركبات المُمكنة. يقدم النموذج عمليات حسابية توضح كيف يمكن أن تُحسَّن المركبات عالية المكننة السلامة على الطرق أو تزيدها سوءًا مع مرور الوقت، بناءً على الافتراضات التالية التي يحددها المستخدم بشأن المركبات عالية المكننة والمركبات غير عالية المكننة:

- التغيير في الطلب على الانتقال في المستقبل بدون مركبات عالية المكننة
- التغيير في أداء سلامة المركبات غير عالية المكننة
- توقيت طرح المركبات عالية المكننة بالسوق، ومعدل ومستوى انتشارها واستخدامها مع مرور الوقت
- أداء السلامة للمركبات عالية المكننة عند توقيت الطرح، ومعدل التحسين في السلامة كوظيفة للأميل المقطوعة، وأقصى أداء ممكن للسلامة
- قابلية الترقية لأسطول المركبات عالية المكننة الحالي لمواكبة أحدث التطورات في أداء المركبات عالية المكننة.

يستخدم النموذج، بناءً على هذه العوامل، تصوُّرات بسيطة للانتشار التكنولوجي، وأوجه النعلُّم التي يمكن العثور عليها في الدراسات السابقة لتقييم السلامة على الطرق في المستقبل بمركبات عالية المكننة وبدونها.³ الغرض الأساسي من الأمثلة المُبينة في دراسة النتائج المستقبلية المحتملة بأكملها هو توضيح كيفية عمل نموذج سلامة المركبات المُمكنة، ويجب ألا تُفسَّر على أنها تنبؤات المؤلفين للمستقبل.

³ يستبعد نموذج سلامة المركبات عالية المكننة العديد من الاتجاهات والظروف التي قد تؤثر على تلك العوامل الرئيسية، على سبيل المثال، معدل النمو الاقتصادي وسعر النفط سيكونان من ضمن عوامل كثيرة ستؤثر على الطلب المستقبلي للانتقال. تضمين هذه الاتجاهات في النموذج لن يُحسِّن دقة النموذج (لأنها أيضًا غير يقينية بشكلٍ كبير)، ولن تزيد القيمة الاستكشافية للنموذج (لأن النتائج ستزداد صعوبة تفسيرها).

يجب أن نجيب عن الأسئلة التالية لتقدير أثر المركبات عالية المكننة على السلامة العامة للمركبة:

- ما هي المركبة عالية المكننة وما هي المركبة غير عالية المكننة؟
- كيف نعرّف المستقبل بالمركبات عالية المكننة ونعرّفه بدون المركبات عالية المكننة؟
- كيف نقيس السلامة على الطرق؟
- كيف تم تقييم السلامة على الطرق بالمستقبل في الدراسات السابقة؟

ما هي المركبة عالية المكننة وما هي المركبة غير عالية المكننة؟

يبين تصنيف جمعية مهندسي السيارات الدولية 2016 لمكننة القيادة (2016). الملخص في الجدول 2.1. ستة مستويات للمكننة. وتماشياً مع السياسات الفيدرالية للمركبات المُمكّنة (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016b). نستخدم مصطلح *المركبات عالية المكننة (HAV)* للإشارة إلى المركبات التي تتطابق مع المستويات 3 أو 4 أو 5 من التصنيف؛⁴ حيث يؤدي نظام القيادة الآلية في هذه المركبات وظيفه القيادة الديناميكية بأكملها عند دمجها.⁵ ونستخدم مصطلح *المركبات غير عالية المكننة* للإشارة إلى المركبات التي تتوافق مع المستويات 0 أو 1 أو 2؛ حيث يؤدي السائق في هذه المركبات جزءاً من وظيفة القيادة الديناميكية أو كلها. ويوضح الجدول 2.1 وصف كل مستوى مأخوذ مباشرةً من تصنيف جمعية مهندسي السيارات الدولية (بخط مائل) وتفسيرنا المُبسّط.

يتمثل العنصر المشترك بين المستوى 0 (القيادة بدون أي مكننة) والمستوى 1 (مساعدة السائق) والمستوى 2 (مكننة القيادة الجزئية) في أن الإنسان الذي يجلس وراء عجلة القيادة هو المسؤول عن بعض وظائف القيادة الديناميكية أو جميعها. حتى عندما تعمل أنظمة مساعدة السائق بضم المستوى 0 المركبات التقليدية دون أنظمة مساعدة السائق المتقدمة لتقديم الدعم للسائق البشري. تنتشر مكننة المستوى 1 على نطاق واسع في هيئة نظام تثبيت السرعة التكيّفي أو المكابح الآلية، وهذه الأخيرة من المُتوقع أن تكون معياراً في جميع طرازات مركبات الركاب الجديدة تقريباً بحلول عام 2022 (وزارة النقل الأمريكية، 2016). وقد قامت بعض شركات تصنيع السيارات بتسويق استقلالية المستوى 2، حيث إنه يتحكم في كل من التوجيه والإسراع (أو المكابح). تتميز مركبات شركة تيسلا المُجهّزة برّبان آلي بمكننة من المستوى 2؛ لأنه من المتوقع أن يمنح السائق البشري اهتماماً متواصلاً للقيادة حتى عند تشغيل الرّبان الآلي، ولكن تُعد مركبات تيسلا أكثر تقدماً من أي مركبة أخرى تقريباً من المستوى 2 فيما يتعلق بالمدى الذي يمكنها التحكم به في المركبة والقيام بمناورات القيادة. وقد أثارَت مركبات المستوى 2 أيضاً شواغل تتعلق بالسلامة؛ لأن هذه التقنيات قد تُشجّع على تشتيت انتباه السائقين، حتى إذا كان من المفترض عليهم الانتباه المتواصل (Trimble et al., 2014).

⁴ يُرجى ملاحظة أن مصطلح *Highly Automated* (عالية المكننة) في تصنيف جمعية مهندسي السيارات الدولية ينطبق على مركبات المستوى 4 بالتحديد، ولكن السياسات الفيدرالية للمركبات المُمكّنة تستخدم مصطلح *Highly Automated Vehicle* (مركبة عالية المكننة) بشكل أوسع نطاقاً.

⁵ تُعرّف جمعية مهندسي السيارات الدولية (2016) وظيفة القيادة الديناميكية بأنها "جميع الوظائف التكنيكية والتشغيلية الآنية اللازمة لتشغيل مركبة أثناء السير على الطرق المرورية، باستثناء الوظائف الاستراتيجية، مثل تحديد موعد الرحلة واختيار الوجهات ونقاط الطريق".

الجدول 2.1. مستويات مكننة القيادة التي وضعتها جمعية مهندسي السيارات الدولية

المستوى	الاسم	الوصف
يؤدي السائق بعض وظائف القيادة الديناميكية أو جميعها (المركبات غير عالية المكننة)		
0	القيادة بدون مكننة	أداء السائق لمهام القيادة الديناميكية بالكامل، حتى عند تدعيم المركبة بأنظمة السلامة النشطة.
1	مساعدة السائق	السائق البشري هو المسؤول مسؤولة كاملة عن القيادة، حتى إذا كانت بعض هذه الوظائف، مثل التحكم الإلكتروني بالثبات، متوفرة وتعمل.
2	القيادة جزئية المكننة	التنفيذ المُحدّد بنطاق تصميم تشغيلي (ODD) والمستخدم بواسطة نظام مكننة قيادة لوظيفة فرعية من وظائف القيادة الديناميكية؛ وهي التحكم في حركة المركبة إما الجانبية أو الطولية (وليس كليهما في وقت واحد) مع التوقع من السائق أن يؤدي الجزء المتبقي من وظائف القيادة الديناميكية. يتحمل السائق البشري المسؤولية الكاملة عن القيادة، ولكن يمكن مساعدته بوظيفة واحدة تُمكن التوجيه أو الإسراع، مثل الحفاظ على الحارة المرورية ونظام تثبيت السرعة التكيفي، ولكن ليس كليهما.
3	مكننة القيادة المشروطة	التنفيذ المُحدّد بنطاق تصميم تشغيلي (ODD) والمستخدم بواسطة نظام مكننة قيادة لمهمتين فرعيتين من مهام القيادة الديناميكية، وهما التحكم في حركة المركبة الجانبية والطولية معًا. مع التوقع من السائق أن يكمل المهمة الفرعية المتمثلة في الكشف عن الحوادث والأجسام، ويشرف على نظام مكننة القيادة.
4	القيادة عالية المكننة	يتحمل السائق البشري المسؤولية الكاملة عن القيادة، ولكن يمكن مساعدته بوظائف تُمكن كلاً من التوجيه والإسراع، مثل الحفاظ على الحارة المرورية ونظام تثبيت السرعة التكيفي؛ حيث يكون السائق البشري هو المسؤول عن مراقبة البيئة والتدخل عند الحاجة.
يؤدي نظام القيادة المكننة وظائف القيادة الديناميكية بالكامل أثناء العمل (المركبات عالية المكننة)		
3	مكننة القيادة المشروطة	الأداء المُحدّد بنطاق تصميم تشغيلي (ODD) والمستخدم بواسطة نظام مكننة قيادة لجميع مهام القيادة الديناميكية، مع التوقع بأن يكون المستخدم المدعوم بنظام بديل لوظائف القيادة الديناميكية مُستقبلاً للطلبات الصادرة من نظام مكننة القيادة للتدخل، فضلاً عن إخفاقات النظام ذات الصلة بأداء وظائف القيادة الديناميكية في أنظمة المركبات الأخرى، وبأنه سيكون قادرًا على الاستجابة بالشكل المناسب.
4	القيادة عالية المكننة	تكون المركبة هي المسؤولة كليًا عن القيادة في ظل ظروف معينة، ولكن قد تطلب التدخل السريع من السائق البشري حسب الحاجة.
5	القيادة كلية المكننة	الأداء غير المشروط (أي غير المُحدّد بنطاق تصميم تشغيلي) والمستخدم بواسطة نظام مكننة قيادة لجميع وظائف القيادة الديناميكية والنظام البديل لوظائف القيادة الميكانيكية دون وجود أي توقع بأن المستخدم سيستجيب لأي طلب للتدخل.
5	القيادة كلية المكننة	تكون المركبة هي المسؤولة كليًا عن القيادة في ظل ظروف معينة ولن تطلب التدخل من السائق البشري.
5	القيادة كلية المكننة	الأداء غير المشروط (أي غير المُحدّد بنطاق تصميم تشغيلي) والمستخدم بواسطة نظام مكننة قيادة لجميع وظائف القيادة الديناميكية والنظام البديل لوظائف القيادة الميكانيكية دون وجود أي توقع بأن المستخدم سيستجيب لأي طلب للتدخل.
5	القيادة كلية المكننة	تكون المركبة هي المسؤولة كليًا عن القيادة في ظل جميع الظروف، ولن تطلب التدخل من أي أحد داخل المركبة، قد لا تحتاج مثل هذه المركبات إلى أي ركاب على الإطلاق.

المصدر: جمعية مهندسي السيارات الدولية، 2016

ملاحظة: يرد شرحنا المُبسّط أدنى كل وصف مكتوب بالخط المائل ومقتبس مباشرة من تصنيف جمعية مهندسي السيارات الدولية (2016، الجدول 2).

^a تُعرّف جمعية مهندسي السيارات الدولية (2016) نطاق التصميم التشغيلي على أنه "الظروف المُحدّدة التي تم فيها تصميم نظام أو خاصية مكننة معينة للعمل".

في المقابل، يعد الشائع في المستوى 3 (مكننة القيادة المشروطة)، والمستوى 4 (القيادة عالية المكننة)، والمستوى 5 (القيادة كلية المكننة) هو أن المركبة تكون مسؤولة عن وظائف القيادة الديناميكية بالكامل عند تشغيل

قدرات القيادة المُمكنة. بالإضافة إلى ذلك، وكما ناقش في الفصل الرابع، نود أن نضيف العلامة الفارقة القائلة بأن التعلم من خلال تجربة القيادة يعد آلية مركزية لتطوير المركبات وتحسينها في المستويات من 3 إلى 5، ويؤدي دوراً أقل بكثير في تطوير المركبات في المستويات من 0 إلى 2.

يسمح المستوى 3 (مكنة القيادة المشروطة) للمركبة بالقيادة، غير أنه يتطلب التدخل من سائق بشري في غضون مدة قصيرة إذا لزم الأمر. وتأتي مركبات الاختبار من غوغل في المستوى 3 من حيث إن قيادتها عالية المكنة، غير أنها يمكن أن تتطلب التدخل حسب الحاجة من مشغل مدرّب. وعلى غرار مركبات المستوى 2، أثارت مركبات المستوى 3 المصممة لاستخدام المستهلكين مخاوف بشأن السلامة؛ نظراً إلى الصعوبة التي يواجهها السائقون في التحكم بالمركبة بأمان (Trimble et al., 2014). وتركز بعض شركات تصنيع السيارات على المستويات الأعلى للمكنة بسبب هذه المخاوف (Davies, 2015; Oremus, 2016).

تطور العديد من شركات صناعة السيارات مركبات المستوى 4، التي تتميز بقيادة عالية المكنة بدون التدخل البشري في العديد من الحالات، وليس جميعها. في حين تطور شركات صناعة السيارات الأخرى مركبات يمكن أن تكون عالية المكنة في جميع الحالات، ولا تتيح مجرد تحكم السائق البشري. فعلى سبيل المثال، ستكون الطرازات الجديدة من شركة تسلا مجهزة بمعدّات حاسوبية من أجل القيادة عالية المكنة بالمستوى 5. مع أنه لن يتم تفعيل هذه الخاصية في الحال. وقد أشارت تسلا إلى أنها ستُشغّل قدرة المستوى 5 في "الوضع التخليقي". وسيتيح هذا الوضع، الذي يقوم بالمحاكاة لكنه لا يتحكم بالمركبة، لتسلا تطوير أنظمة المستوى 5. واختبارها عبر قطع ملايين من أميال القيادة الحقيقية قبل تفعيلها في مركبات مصممة للمستهلكين (Nishimoto, 2016). وبدءاً من 2017، لم تكن المركبات في المستوى 3 إلى 5 متاحة للمستهلكين لاستئجارها أو شرائها، غير أن الاختبارات التجريبية جارية مع وجود سائقيين مدربين معنيين بالسلامة خلف المقود.

كيف نعرّف مستقبلاً يشهد استخدام المركبات عالية المكنة ومستقبلاً بدونها؟

نظراً إلى تعريفات المركبات عالية المكنة والمركبات غير عالية المكنة والمستويات الستة من المكنة، نعرّف المستقبل بدون المركبات عالية المكنة على أنه ذلك الذي يحتوي على مزيج من مركبات المستوى 0 و1 و2، غير أنه لا يحتوي على أي من مركبات المستوى 3 أو 4 أو 5. أما المستقبل الذي به مركبات عالية المكنة فيحتوي على مركبات بجميع المستويات.

كيف نقيس السلامة على الطرق؟

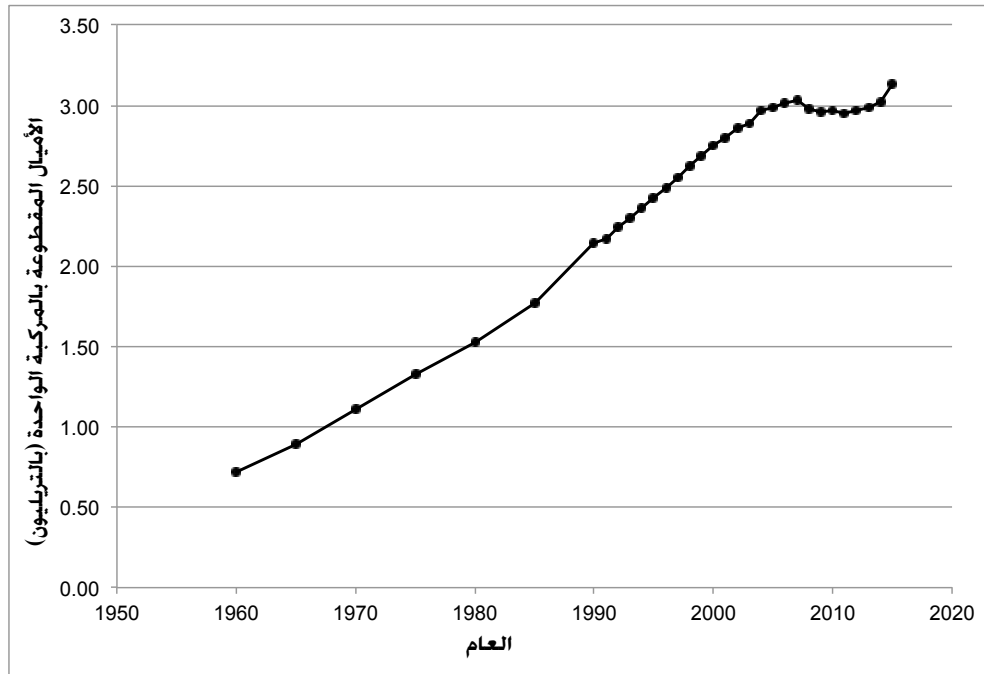
عادةً ما يتم قياس السلامة من حيث الوفيات والإصابات وحوادث الاصطدامات التي تضر بالممتلكات فقط، سواءً من حيث القيم المطلقة ومعدل الأميال التي تقطعها المركبة. وستحدث المركبات عالية المكنة تغييراً على مستقبل السلامة على الطرق عبر أي من هذه المقاييس. وقد لا تؤثر عليها بالطريقة ذاتها. فعلى سبيل المثال، يمكن للمركبات عالية المكنة تقليص حوادث الاصطدام طفيفة العواقب وعالية الاحتمالية التي تضر بالممتلكات فقط، مع زيادة حوادث الاصطدام متعددة المركبات مرتفعة العواقب ومنخفضة الاحتمالية.

يمكن استخدام نموذج سلامة المركبات المُمكنة لاستكشاف السلامة في أي من هذه الحالات: تشير معادلات النموذج الذي نوضحه إلى معدل الأداء العام فقط، التي يمكن أن تعكس أيًا من هذه المقاييس. وتظل معادلات النموذج كما هي رغم ذلك. وبالمثل، يمكن استخدام النموذج في استكشاف السلامة على الطرق في أماكن مختلفة حول العالم.

وستكون هناك مجموعة قليلة من المعلمات المتعلقة بمعدلات أداء السلامة في حاجة إلى تغيير لتعكس المقاييس المختلفة للسلامة أو المناطق الجغرافية ذات الاهتمام. يتم احتساب إجمالي الحوادث (سواء كانت وفيات أو إصابات أو حوادث اصطدام) على أنه ناتج نسبة القيادة التي ستتم، من حيث عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة، ودرجة القيادة الآمنة من حيث الحوادث لكل ميل مقطوع. وتمثل حوادث السلامة التراكمية مجموع الحوادث على مدى عدة سنوات. ولأغراض توضيح نماذج سلامة المركبات المُمكنة فإننا، مع ذلك، نركز على الوفيات في الولايات المتحدة.

منذ سبعينيات القرن العشرين، زاد عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة في الولايات المتحدة، كما هو موضح في الشكل 2.1. ومن المتوقع أن يستمر هذا الاتجاه (الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة، 2016). مع أن انتشار المركبات عالية المكننة قد يؤثر على هذا المسار (Anderson et al., 2016; Fagnant and Kockelman, 2015; Bierstedt et al., 2014) بالحد من تكلفة القيادة وإتاحة التنقل لكبار السن. والأفراد ذوي الإعاقات، وغيرهم ممن لا يمكنهم القيادة حاليًا.

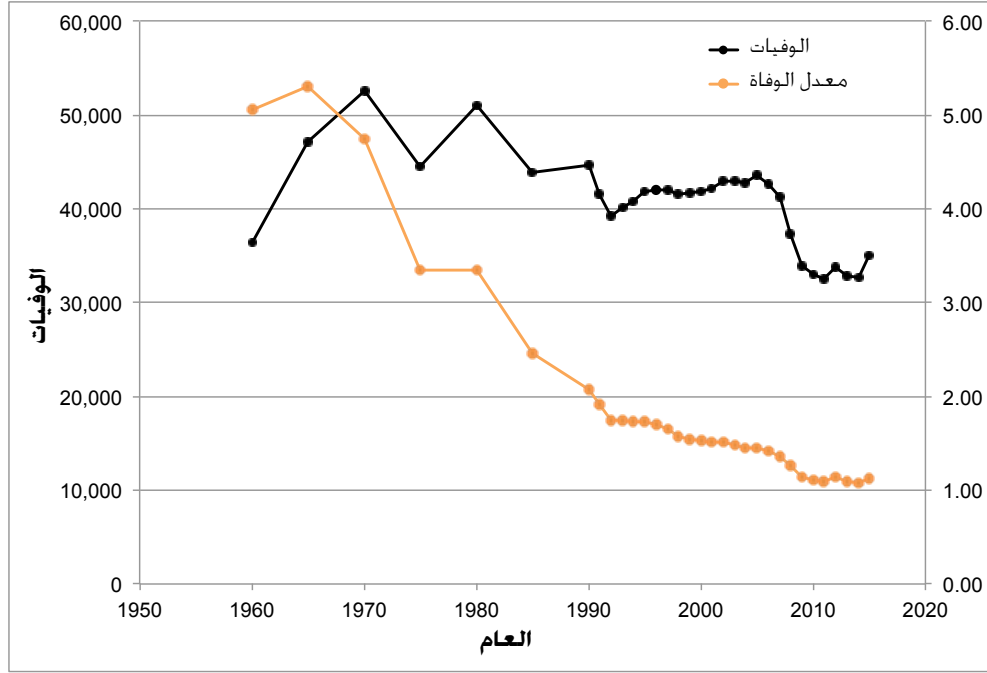
الشكل 2.1. عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة في الولايات المتحدة، حسب العام



المصدر: الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a.

كما هو موضح في الشكل 2.2، فرغم زيادة عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة، فقد تقلصت الوفيات الناجمة عن السيارات بمرور الوقت، من أعلى مستوى بلغ أكثر من 51,000 حالة وفاة في 1979 إلى مستوى منخفض أقل من 32,500 حالة وفاة في 2011. تراجع معدل الوفيات أيضًا بوجه عام، وإن كان هناك ارتفاع في السنوات الأخيرة. وبينما تصبح المركبات أكثر أمانًا بوجه عام من خلال استخدام معدات سلامة أفضل (وسائد هوائية، أنظمة مكابح مضادة للغلق، أنظمة مساعدة السائق، وما إلى ذلك)، فإن الزيادات في عوامل تشتت السائقين (مثل الهواتف المحمولة والأجهزة الأخرى) تدخل ضمن العوامل التي تقابل هذه المزايا (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a).

الشكل 2.2. الوفيات على الطرق ومعدلات الوفاة في الولايات المتحدة، حسب العام

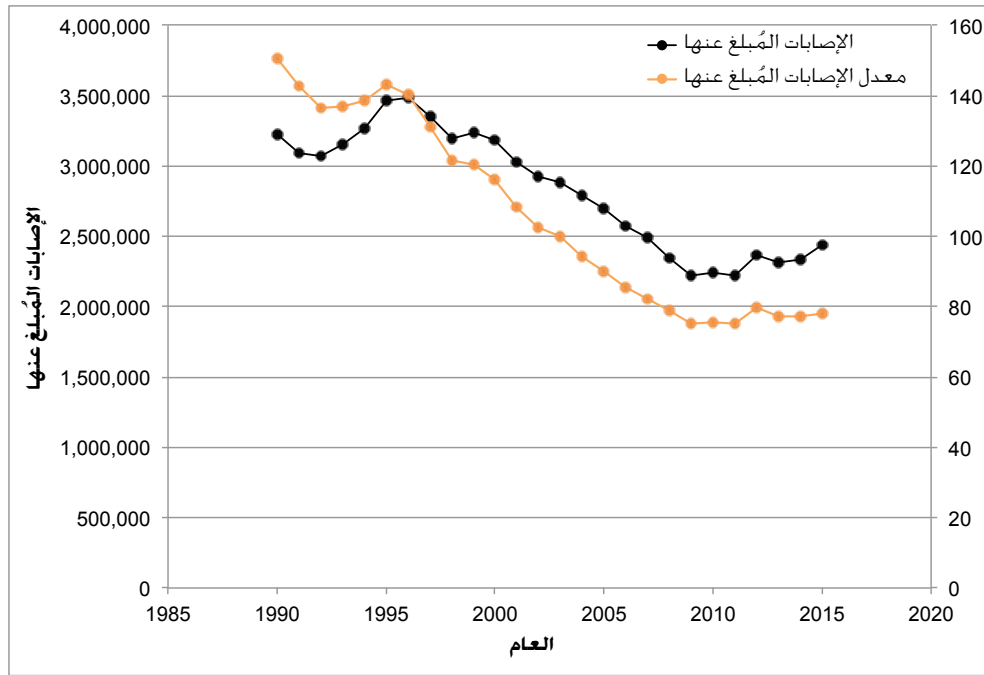


المصدر: الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a.

لغرض المقارنة، يوضح الشكل 2.3 معدلات الإصابة والإصابات السابقة على الطرق المُبلِّغ عنها للشرطة، ويوضح الشكل 2.4 معدلات حوادث الاصطدام وحوادث الاصطدام السابقة المُبلِّغ عنها للشرطة. توضح هذه البيانات أن المعدلات وحوادث الاصطدام والإصابات انخفضت بوجه عام، وإن كان هناك ارتفاع في السنوات الأخيرة. ومع ذلك، فإنه من المهم ملاحظة أن الإصابات وحوادث الاصطدام قد تكون أقل من المُبلِّغ عنها بشكل كبير، بنسبة 25 بالمائة و60 بالمائة، على التوالي، وفقاً لإحدى الدراسات (Blincoe et al., 2015). ومن ثم، لا تعرض هذه البيانات سوى لمحة جزئية عن السلامة.

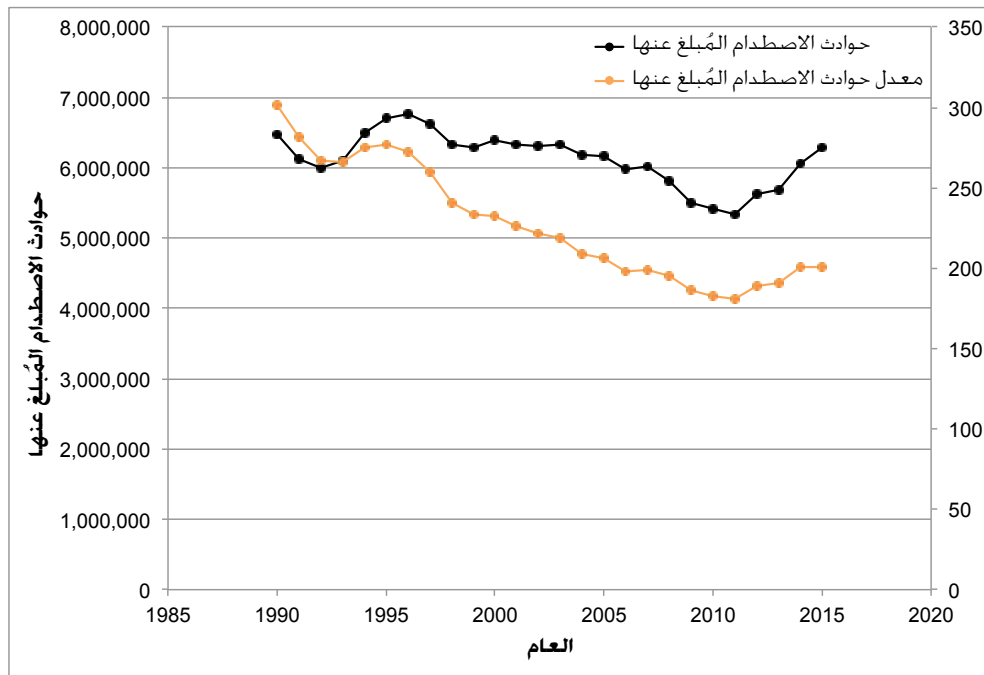
يوضح نموذج سلامة المركبات المُمكنة مدى إمكانية تطور سلامة المركبات غير عالية المكننة والمركبات عالية المكننة على مدار فترة 50 عاماً، من عام 2020 حتى 2069. يتيح النموذج تغير عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة، ومعدلات السلامة (أي الحوادث وفق عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة) لكل من المركبات غير عالية المكننة والمركبات عالية المكننة في هذا الإطار الزمني بناءً على مدخلات المستخدمين. يفترض النموذج أن عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة ومعدلات السلامة ستتغير بسلاسة مع مرور الوقت، ولكن في الواقع سيكون هناك على الأرجح فترات متقطعة قد تتغير خلالها المعدلات تغيراً كبيراً، مما يعكس قفزات تكنولوجية أو تطورات أخرى. يفترض نموذج سلامة المركبات المُمكنة كذلك، مثل الكثير من تقنيات السيارات الأخرى (بما في ذلك المركبات التقليدية)، أن المركبات عالية المكننة فقط ستصبح أكثر أماناً بمرور الوقت بالاستفادة من الخبرة والتعلم والتطوير.

الشكل 2.3. معدلات الإصابة وحوادث الإصابات على الطرق المُبلّغ عنها في الولايات المتحدة، حسب العام



المصدر: الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a.

الشكل 2.4. معدلات الاصطدام وحوادث الاصطدام المُبلّغ عنها في الولايات المتحدة، حسب العام



المصدر: الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a.

كيف تم تقييم السلامة على الطرق بالمستقبل في الدراسات السابقة؟

يوجد الكثير من التقديرات لفوائد أنواع مختلفة من أنظمة مساعدة السائق المتقدمة، أو أنظمة تجنب حوادث الاصطدام، فردية أو مجتمعة (Gordon et al., 2010; Funke et al., 2011; Perez et al., 2011; Jermakian, 2011; Harper, 2016). عادة ما يتم تصنيف المركبات المجهزة بهذه التقنيات على أنها مُمكنة من المستوى 1 أو المستوى 2 وفقاً لتصنيف جمعية مهندسي السيارات الدولية، وتعتبر مركبات غير عالية المكننة. كمثل على ذلك، يُلخص تقرير Funke et al. (2011) إمكانات السلامة في أربع تقنيات لتجنب الاصطدام على أنها نتيجة لحجم مشكلة الاصطدام في أسطول سيارات الولايات المتحدة بأسره (على سبيل المثال، عدد حوادث الاصطدام السنوية المتعلقة بمغادرة الحارة المرورية) وجزء من حوادث الاصطدام، هذه التي يمكن التخفيف من حدتها بفضل التكنولوجيا (على سبيل المثال، من نظام تحذير مغادرة الحارة المرورية). وتُبدل أيضاً جهود لتقدير مزايا تقنيات المركبات المتصلة، التي تستخدم فيها التطبيقات على متن المركبة الاتصال مع مركبات أو بنية أساسية أخرى لتحسين السلامة، على سبيل المثال، لتنسيق حركة المركبات من خلال التقاطع (Najm, Toma, and Brewer, 2013; Eccles et al., 2012).

يصف تقرير راو (Rau) وياناجيساوا (Yanagisawa) ونجم (2015) طريقة لتحديد أنواع حوادث الاصطدام الحالية، وعددها المحتمل التي يمكن التخفيف من حدتها بواسطة التقنيات بين الاستقلالية من المستوى 2 والمستوى 5. يعتمد لي (Li) وكوكلمان (2016) (Kockelman) على هذه المنهجية لتقدير مزايا السلامة لمجموعة متنوعة من تقنيات المركبات المتصلة وتقنيات المركبات المُمكنة من المستوى 1 والمستوى 2، بافتراض اعتماد هذه التقنيات على نطاق واسع. وإحراز تقدم عن العمل السابق، يقدر لي وكوكلمان (2016) كلاً من أنواع وشدة حوادث الاصطدام التي كان يمكن تجنبها من خلال كل نوع من أنواع التكنولوجيا، فضلاً عن الميزة الاقتصادية لتلك الوفورات. يقيّم المؤلفون المزايا في ظل ثلاثة سيناريوهات لكفاءة التكنولوجيا آخذين في الاعتبار وجود نطاق الشك في الأداء التكنولوجي.

توجد تقديرات أقل لمزايا السلامة التي توفرها المركبات عالية المكننة، وليس هناك إجماع حتى الآن بين هذه التقديرات (Winkle, 2015). يقدر فاجنانت وكوكلمان (2015) المزايا الاجتماعية للمستوى 4 والمستوى 5 من المركبات عالية المكننة عبر مجموعة متنوعة من فئات المزايا، التي تشمل السلامة⁶ بالاعتماد على النتائج المستخلصة التي توصلت إليها الدراسة الاستقصائية "أسباب حوادث الاصطدام التي أجرتها شركة "National"Motor"Vehicle"، التي توصلت إلى أن الأخطاء البشرية تمثل 93 بالمئة من حوادث الاصطدام هذه الأيام (الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2008). يفترض فاجنانت وكوكلمان في حساباتهم أن المركبات عالية المكننة تقلل معدلات الاصطدام والإصابات بنسبة 50 بالمئة في معدل اختراق السوق 10 بالمئة وبنسبة 90 بالمئة في معدل اختراق السوق 90 بالمئة. على النقيض من ذلك، قامت فرقة العمل المعنية بالمركبات المُمكنة التابعة لجمعية Casualty Actuarial Society بتقييم النتائج المستخلصة من الدراسة الاستقصائية "أسباب حوادث الاصطدام التي أجرتها شركة "National"Motor"Vehicle" في سياق المركبات عالية المكننة. توصلت الدراسة التي أجرتها فرقة العمل أنه يمكن للمركبات عالية المكننة معالجة نصف الحوادث تقريباً، في حين أن "نسبة 49٪ من الحوادث يوجد بها عامل مقيد واحد على الأقل يمكنه تعطيل تكنولوجيا [المركبات عالية المكننة] أو تقليل فعاليتها" (جمعية Casualty Actuarial Society، عام 2014).

⁶ لا تحدد الدراسة بوضوح مستويات الاستقلالية التي يدرجها المؤلفون في حساباتهم، لكننا نستنتج أنها تشير إلى الاستقلالية للمستوى 4 والمستوى 5، وليس المستوى 3.

تقدم هذه الدراسات السابقة رؤى مهمة حول مدى إمكانية تخفيف مختلف تقنيات المركبات عالية المكننة والمركبات غير عالية المكننة من حدة حوادث الاصطدام هذه الأيام. ومع ذلك، لم يتم استخدام هذه الرؤى حتى الآن لفهم مدى فقد تأثيرات السلامة لقوتها بمرور الوقت بسبب اعتماد تقنيات مختلفة في أطر زمنية مختلفة، وتغير كفاءة التقنيات أثناء نشرها. من الصعب استخدام هذه التقديرات لإعداد هذه التوقعات لسببين رئيسيين. أولاً، تركّز التقديرات عمومًا على الكيفية التي يمكن للتكنولوجيات أن تخفف بها من حدة أنواع حوادث الاصطدام التي تتسبب فيها العوامل البشرية حاليًا. ولكنها تتغاضى عن السبل المهمة التي يمكن أن تضيفها التقنيات الجديدة إلى حوادث الاصطدام. يمكن أن يحدث هذا إذا قوضت التكنولوجيا مهارات السائقين أو شتت انتباههم. فالتكنولوجيا معرضة لحالات تعطل الأمن الإلكتروني التي تؤدي إلى أنواع جديدة من حوادث الاصطدام. أو يزداد ببساطة أداء المركبات عالية المكننة سوءًا عن السائقين من البشر. حتى في البداية (Kalra, 2017).⁷ كما تشير Casualty Actuarial Society. "يجب ألا يتم تحديد سلامة المركبات المُمكّنة وفق معايير اليوم، فالأمور التي تسبب الحوادث هذه الأيام ربما تكون أسبابًا للحوادث في عصر المركبات المُمكّنة أو قد لا تكون من أسبابها" (2014، ص 1). ويصعب توقع مخاطر السلامة الجديدة، مما يجعل التأثير الكامل للكثير من التقنيات الجديدة غير محدد بشدة.

ثانيًا، تقارن هذه التقديرات الحالية أيضًا المزايا الهامشية لتقنية ما بأداء السلامة للسائقين والمركبات الحالية. ومع ذلك، يتم تقدير ميزة سيارة مزودة بتقنية معينة في وقت ما في المستقبل بشكل أكثر صراحة عند مقارنتها بأداء المركبات المستقبلية بدون تلك التقنية في ذلك الوقت المستقبلي ذاته، بدلاً من المركبات الموجودة في الظروف الحالية.

يشير الوضع السابق للوسائد الهوائية إلى هذه المشكلات (Anderson et al., 2016; Houston and Richardson, 2000). عندما تم طرح الوسائد الهوائية لأول مرة بالأسواق في سبعينيات القرن العشرين، فقد كانت مصممة لحماية راكب بالغ ذكر بدون حزام أمان. وكان متخيلًا أنها ستكون بديلاً، وليست ملحقة، لأحزمة الأمان. التي استُخدمت بعد ذلك على فترات متباعدة. استندت تقديرات مزايا السلامة المستقبلية التي أُجريت في ذلك الوقت إلى حالة الاستخدام هذه. وأثبتت في النهاية أنها مبالغ فيها بأضعاف مضاعفة. ويُعزى ذلك إلى انتشار استخدام أحزمة الأمان انتشارًا واسع النطاق في الوقت ذاته الذي انتشر فيه استخدام الوسائد الهوائية. ومن ثم كانت الميزة الهامشية للوسائد الهوائية أقل بكثير من المتوقع. بالإضافة إلى ذلك، فإنه في حين أن الوسائد الهوائية لا تزال تنقذ العديد من الأرواح. فإن القوة اللازمة لحماية الذكور البالغين غير المزودين بحزام أمان قد تسببت في إصابة العديد من الركاب قصار القامة ومقتلهم (كالنساء والأطفال) الذين كان من الممكن نجاتهم من حادث الاصطدام غير أن الوسائد الهوائية لم تعمل. وقد أدت هذه الحوادث إلى إدخال تحسينات على تقنية الوسائد الهوائية. ولكنها أظهرت أيضًا أن الوسائد الهوائية قد فرضت مخاطر اصطدام جديدة حتى في الوقت الذي عملت فيه على تخفيف المخاطر الحالية.

باختصار، يُعد التطور بعيد الأمد للسلامة على الطرق عاملاً مهمًا لفهمها. وإن كان معقد وغير مؤكد بشكل كبير ويصعب التنبؤ به. يسد هذا العمل ثغرة في الدراسات السابقة القائمة باستخدام منصة نمذجة بسيطة لمعرفة تأثير سلامة المركبات عالية المكننة في ظل السياسات والظروف المختلفة. تستخدم دراسة متابعة (Kalra and Groves, 2017) نماذج سلامة المركبات المُمكّنة للوصول إلى فهم أفضل للعوامل التي تسهم في السلامة على الطرق. وتحديد مدى قدرة السياسات المتماسكة على المساعدة على تشكيل مستقبل أكثر أمانًا.

⁷ ومما يزيد الأمور تعقيدًا، كما يشير كالرا و بادوك (Kalra and Paddock, 2016)، فهو عدم وجود طريقة مقبولة في الوقت الحالي لتقييم سلامة المركبات عالية المكننة من خلال مؤثوقية إحصائية قبل طرحها للاستخدام على نطاق واسع. لذلك، من المحتمل ألا يكون أصحاب الشأن على معرفة بمدى أمان هذه التقنية.

نمذجة السلامة في مستقبل بدون المركبات عالية المكننة

السلامة التي يتم قياسها بعدد حوادث السلامة هي نتاج عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة، ومعدلات السلامة (الحوادث لكل عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة). كما هو موضح في الفصل الثاني. قد تتغير كل من هذه المعدلات في مستقبل بدون المركبات عالية المكننة، كما كانت عليه سابقاً. والطريقة التي ستتغير بها هذه المعدلات غير مؤكدة لكن يمكن نمذجتها باستخدام علاقات بسيطة.

معدلات السلامة المستقبلية للمركبات الآلية غير عالية المكننة

تتوقع الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة إجمالي عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة المستقبلية. تشير توقعاتها لعام 2016، على سبيل المثال، إلى أنه بدءاً من عام 2014 إلى عام 2044، يمكن أن يزداد إجمالي عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة بين 0.53 بالمئة و0.65 بالمئة سنوياً (الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة، 2016). وفي حين أن هذه الحدود نفسها غير مؤكدة وتشمل التغييرات المحتملة جزئاً استخدام المركبات عالية المكننة،⁸ فإن نموذج الزيادة السنوية المركبة يمثل أهمية في التفكير بشأن التغييرات في عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة غير عالية المكننة بمرور الوقت.

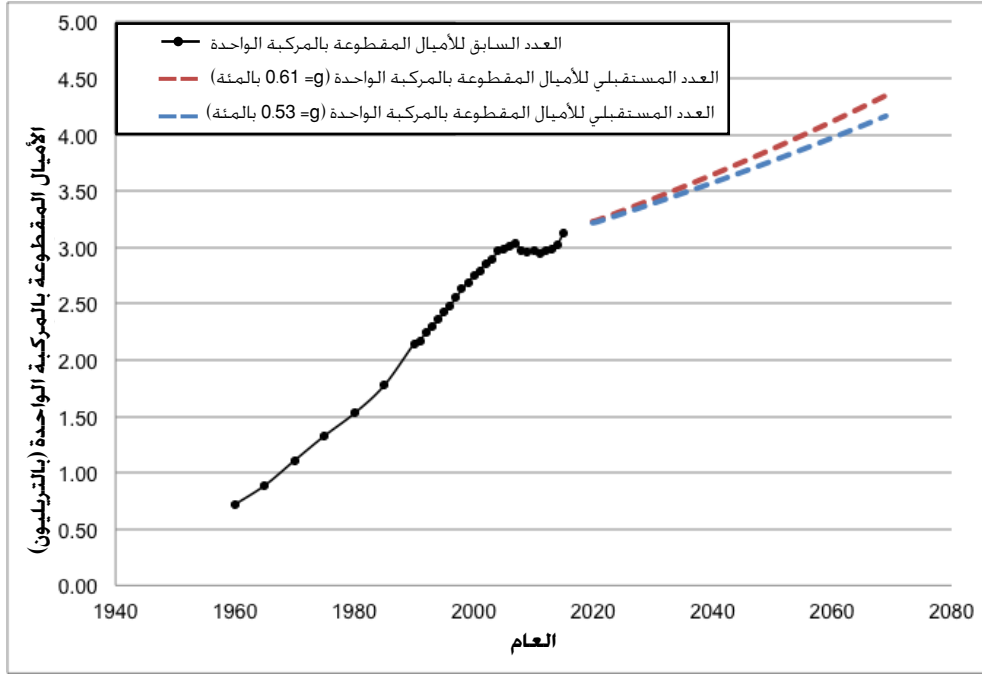
يمكننا نمذجة عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في مستقبل بمركبات عالية المكننة باستخدام المعادلة 3.1، وذلك باستخدام نقطة مرجعية تصل إلى 3.131 تريليونات من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في 2015.

$$(3.1) \quad VMT_x = 3.131 \times 10^{12} \times (1 + g)^{(x-2015)},$$

بما أن x هي السنة المستقبلية، و g هي معدل الزيادة السنوية المُركَّبة في عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة المحدد من جانب المستخدم، بافتراض عدم وجود مركبات عالية المكننة. يوضح الشكل 3.1 إجمالي السابق لعدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة وسيناريوهين للإجمالي المستقبلي لعدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة تحت فرضيتين مختلفتين بشأن الزيادة المُركَّبة على مدار فترة دراسة النموذج من 2020 إلى 2069.

⁸ وفقاً للإدارة الفيدرالية للطرق السريعة، فإن توقعاتها تتضمن مجموعة متنوعة من نطاقات الشك، مثل الشك في النمو الاقتصادي المستقبلي، واستخدام المركبات وملكيته، والتقنيات مثل المركبات عالية المكننة.

الشكل 3.1. العدد السابق للأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة، وسيناريوهان للعدد المستقبلي للأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة



معدل سلامة المركبات غير عالية الممكنة بمرور الوقت

بينما انخفضت معدلات الوفاة على الطرق انخفاضاً ملحوظاً منذ خمسينيات القرن العشرين، كان هناك مستوى مستقر نسبياً على مدى العقد الماضي وزيادة في السنوات الأخيرة (مكتب إحصاءات المواصلات، 2016). تشير تقديرات مزايا السلامة الخاصة بأنظمة مساعدة السائق المذكورة في الفصل الثاني إلى أن المركبات غير عالية الممكنة ستصبح أكثر أماناً بمرور الوقت، ومع ذلك، فإنه من الممكن أيضاً ارتفاع معدلات الوفيات إذا فاقت مزايا السلامة هذه التقنيات بتراجع انتباه السائق ومهارته (التي ستظل ضرورية لقيادة المركبات غير عالية الممكنة) أو غيرها من سلوكيات عدم التكيف (Milakis, van Arem, and van Wee, 2017). لإدراج حالة اليقين هذه، نستخدم نموذجاً خطياً بسيطاً يحتسب معدلات الأمان s_x (على سبيل المثال، الوفيات لكل ميل مقطوع بالمركبة الواحدة) في السنة x بناءً على معدلات السلامة في السنة المرجعية 2015، s_{2015} ، وتوقع مستخدم لمعدلات السلامة للمركبات غير عالية الممكنة في عام 2069، s_{2069} ، كما هو موضح في المعادلة 3.2:

$$s_x = mx + b,$$

(3,2)

حيث

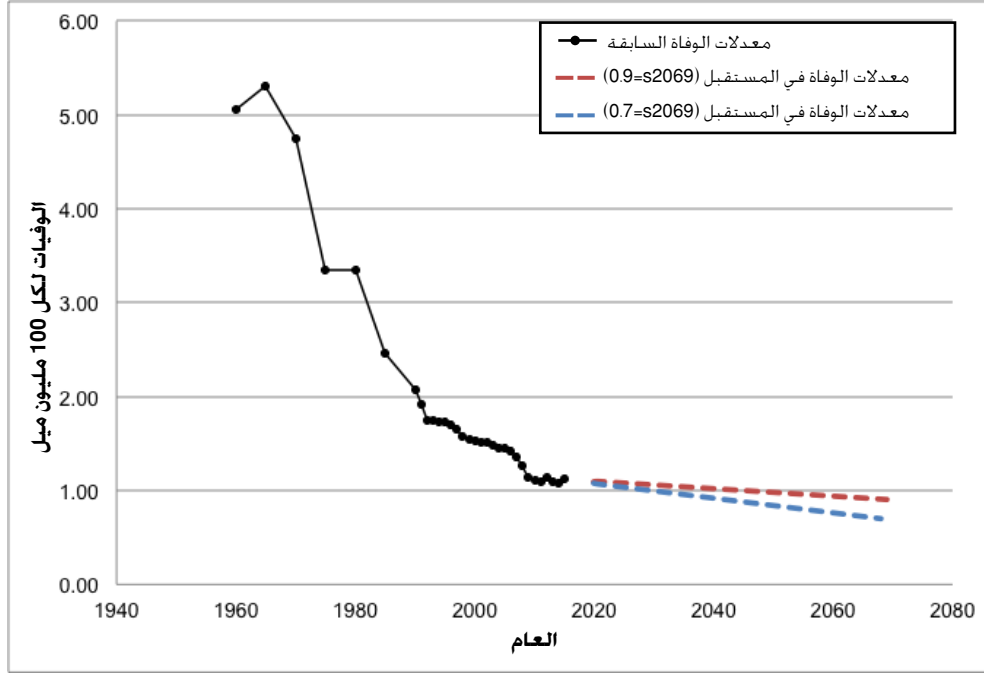
$$m = \frac{(s_{2015} - s_{2069})}{(2015 - 2069)}$$

$$b = ms_{2015} - 2015.$$

هنا، قد تمثل القيمتان s_{2015} و s_{2069} معدلات الوفاة أو الإصابة أو حوادث الاصطدام لكل عدد من الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة، بناءً على مقياس السلامة المستخدم. يبين الشكل 3.2 معدلات الوفاة السابقة وسيناريوهين لمعدلات

الوفاة في المستقبل لمركبات غير عالية المكننة. يفترض أحد السيناريوهات المستقبلية أن معدل الوفاة ينخفض إلى 0.9 من الوفيات لكل 100 مليون ميل في عام 2069، وهو انخفاض بنسبة 20% مقارنة بمعدل الوفيات في عام 2015 البالغ 1.12 من الوفيات لكل 100 مليون من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة. هنا، $s_{2015} = 1.12 \times 10^{-8}$ و $s_{2069} = 0.9 \times 10^{-8}$. يفترض السيناريو المستقبلي الآخر أن معدل الوفاة ينخفض إلى 0.7 من الوفيات لكل 100 مليون من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في عام 2069، وهو انخفاض بنسبة 40% مقارنة بمعدل الوفاة في عام 2015. هنا، $s_{2069} = 0.7 \times 10^{-8}$.

الشكل 3.2. معدلات الوفاة السابقة وسيناريوهان لمعدلات الوفاة في المستقبل



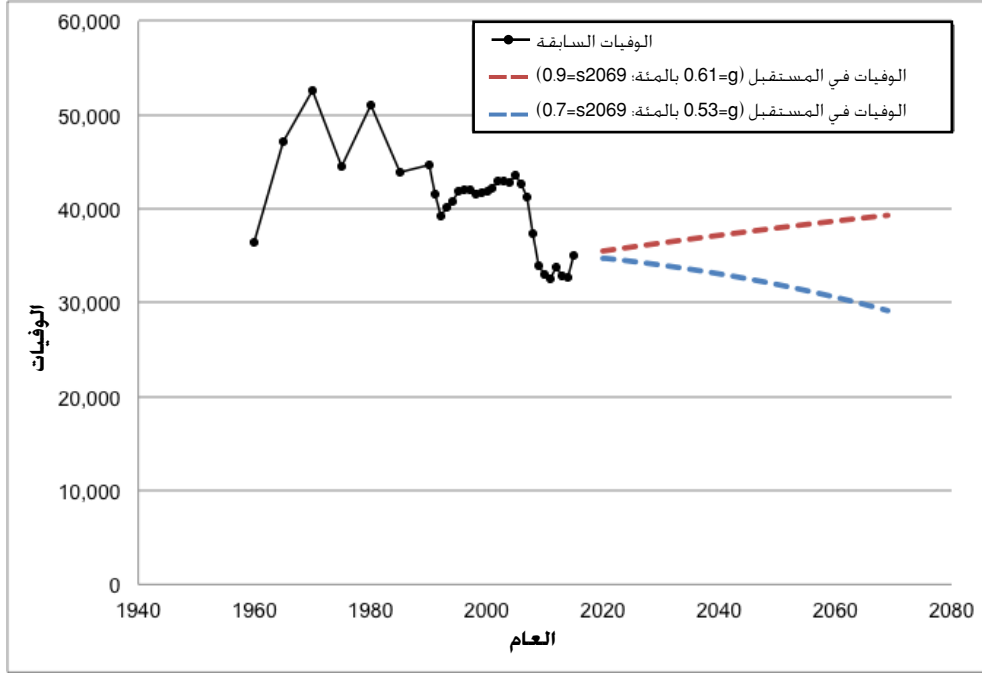
معدل أمان المركبات عالية المكننة بمرور الوقت

يكون حساب عدد أحداث السلامة f أمرًا بسيطًا بمجرد تحديد عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة سنويًا ومعدلات السلامة باستخدام المعادلتين 3.1 و 3.2. كما هو موضح في المعادلة 3.3:

$$(3.3) \quad f = s_x VMT_x .$$

يوضح الشكل 3.3 الوفيات السابقة وسيناريوهين للوفيات المتوقعة في المستقبل دون مركبات عالية المكننة، وذلك باستخدام معدلات الوفاة وأعداد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة المتوقعة سنويًا كما هو موضح في الشكلين 3.1 و 3.2. يزداد معدل الوفيات السنوي في أحد السيناريوهات بشكل عام؛ لأن الزيادة في عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة ($g = 0.61$) تتجاوز الانخفاض البسيط في معدلات الوفيات ($s_{2069} = 0.9$). ينخفض معدل الوفيات السنوي في السيناريو الآخر؛ لأن الزيادة في عدد الأميال الكلية المقطوعة بالمركبة الواحدة ($g = 0.53$) توازن الانخفاض الكبير في معدلات الوفاة ($s_{2069} = 0.7$).

الشكل 3.3. الوفيات السنوية السابقة وسيناريوهان للوفيات السنوية في المستقبل



ومن الآن فصاعدًا، فإننا نطلق على المستقبل بدون مركبات عالية المكننة خط الأساس، وهو الذي يُقارن مع المستقبل بمركبات عالية المكننة. لاحظ أن مستخدم النموذج يمكنه ضبط تفاصيل خط الأساس. تفترض جميع الأشكال الواردة في الفصل الرابع القيم الأخيرة لمستقبل خط الأساس $g = 0.53$ بالمئة و $s_{2069} = 0.7$.

نمذجة السلامة في مستقبل بمركبات عالية المكننة

عدد حوادث السلامة في مستقبل بمركبات عالية المكننة هو مجموع الحوادث بين المركبات عالية المكننة والمركبات غير عالية المكننة. ويأتي هذا مُوضَّحاً في المعادلة 4.1.

$$(4.1) \quad f_x = VMT_{n,x} s_{n,x} + VMT_{a,x} s_{a,x},$$

حيث

- f_x هو عدد حوادث السلامة في السنة x
- $VMT_{n,x}$ هو عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة غير عالية المكننة في السنة x
- $s_{n,x}$ هو معدل السلامة للمركبات غير عالية المكننة في السنة x
- $VMT_{a,x}$ هو عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة في السنة x
- $s_{a,x}$ هو معدل السلامة للمركبات عالية المكننة في السنة x

لاحظ أنه بالنسبة لهذه المعادلة، فإن VMT_n زائد VMT_a يساوي إجمالي عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في مستقبل بمركبات عالية المكننة. نبدأ بوصف طريقة نمذجتنا لعدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة غير عالية المكننة وعالية المكننة، ثم نُوضِّح كيف نمذجنا معدلات السلامة للمركبات عالية المكننة وغير عالية المكننة.

عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة وغير عالية المكننة بمرور الوقت

يعتمد عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة (VMT_a) وغير عالية المكننة (VMT_n) على عاملين: (1) توقيت الاعتماد على المركبات عالية المكننة ومدى سرعة الاعتماد عليها، و(2) نسبة قيادة المركبات عالية المكننة مقارنة بالمركبات غير عالية المكننة. وهما عاملان إضافيان بجانب العوامل اللازمة لنمذجة عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في مستقبل بدون مركبات عالية المكننة.

نعتبر انتشار المركبات عالية المكننة بمرور الوقت على أنه جزء من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة الذي يمكن أن يُعزى في الأساس إلى المركبات عالية المكننة، والوقت الذي تستغرقه للوصول إلى هذا المستوى من "الانتشار الكامل". نقوم بنمذجة هذا النمط من الانتشار باستخدام دالة لوجستية. غالباً ما تُستخدم الدوال اللوجستية (أو "المنحنيات السينية" الأخرى) لنمذجة انتشار التقنية أو الظواهر الأخرى التي يكون النمو فيها بطيئاً في البداية، ثم ينمو نموّاً أُسِّيّاً. ثم يتباطأ إلى نمو خطي عند بدء التشبع، ثم يتوقف عند النضج الكامل (Karshenas and Stoneman, 1993; Jeyaraj and Sabherwal, 2015). تأتي الدالة اللوجستية لتعطي نتائج تقريبية منطقية لسيناريوهات أكثر تفاصيل عن انتشار المركبات عالية المكننة التي وضعها آخرون، مثل بانسال (Bansal) وكوكلمان (Kockelman) (2017) وليتمان (2017). يتم وصف الدالة اللوجستية القياسية بواسطة المعادلة 4.2:

$$(4.2) \quad f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}.$$

أدرجنا x لوصف الزمن بالسنوات وأدرجنا $f(x)$ لوصف انتشار المركبة عالية المكننة كجزء من خط القاعدة لعدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة. وهذا يتطلب تحديد أربعة معلمات:

- A_{max} هو أكبر جزء من خط القاعدة لعدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة الذي ستحل محله القيادة عالية المكننة في سنة واحدة.⁹ إذا كان من المتوقع أن تحل المركبات عالية المكننة محل مركبات القيادة البشرية يومًا ما، فإن $A_{max} = 1$. أو قد تستمر مركبات القيادة البشرية، وحينها يكون $0 < A_{max} < 1$.
- x_a هو العام الذي يكون فيه نسبة من الجزء a من أميال خط القاعدة مقطوعة بواسطة مركبات عالية المكننة.
- $x_{(1-a)}$ هو العام الذي يكون فيه نسبة من الجزء $1-a$ من أميال خط القاعدة مقطوعة بمركبات عالية المكننة.

وينتج عن ذلك المعادلة 4.3، حيث يكون الجزء M_x من أميال خط القاعدة مقطوعًا بواسطة مركبات عالية المكننة كل عام:

$$M_x = \frac{A_{max}}{1 + e^{-(mx+b)}} , \quad (4.3)$$

حيث

$$m = \frac{2 \ln \left(\frac{1-a}{a} \right)}{x_{1-a} - x_a}$$

$$b = -\ln \left(\frac{1-a}{a} \right) - mx_a .$$

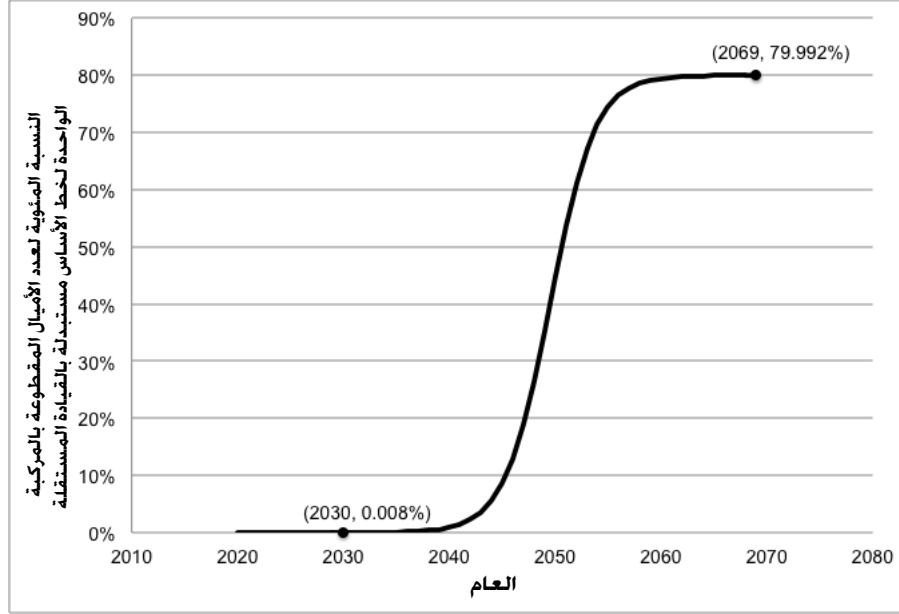
يوضح الملحق A التحول الرياضي للدالة اللوجستية (معادلة 4.2) إلى دالة كسرية خاصة بالأميال المقطوعة بطريقة عالية المكننة بمرور الوقت (معادلة 4.3).

يوضح الشكل 4.1 منحنى انتشار النسبة المئوية للأميال خط الأساس M_x المقطوعة بمركبات عالية المكننة في السنة x ، في سيناريو يتم فيه تحقيق نسبة 0.01 بالمئة من الانتشار في عام 2030 وتحقيق نسبة 99.99 بالمئة من الانتشار في عام 2069.¹⁰ ويحدث الانتشار الأقصى عند مكننة 80 بالمئة من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة لخط الأساس بدرجة عالية. في هذا السيناريو، توضح $x_a = 2030, x_{(a-1)} = 2069, A_{max} = 0.8$ نقاط البيانات الدالة على سنوات انتشار خط الأساس. لقد حدث 0.01 بالمئة من الانتشار في عام 2030، وتم استبدال 0.008 بالمئة من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة لخط الأساس بالقيادة عالية المكننة. وقد حدث 99.99 بالمئة من الانتشار في عام 2069، وتم استبدال 79.992 بالمئة من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة لخط الأساس بالقيادة عالية المكننة.

⁹ على سبيل المثال، إذا كان عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة هو 3 تريليونات ميل بمركبة غير عالية المكننة في خط القاعدة المستقبلي، وكان A_{max} يبلغ 66%، فإنه في مستقبل بمركبات عالية المكننة، سيتم استبدال 2 تريليون من تلك الأميال بالقيادة عالية المكننة وسيبقى 1 تريليون من أميال القيادة البشرية.

¹⁰ للمقارنة، يشير ليطمان (2017) إلى أن الكثير من تقنيات المركبات تحتاج من 30 إلى 50 عامًا لتطبيقها على نسبة تبلغ 90 بالمئة أو تزيد من المركبات العاملة.

الشكل 4.1. سيناريو النسبة المئوية لأميلال خط الأساس التي ستقطعها المركبات عالية المكننة في المستقبل



ملاحظة: يوضح هذا الشكل منحنى الانتشار بمرور الوقت في ظل سيناريو تتحقق فيه نسبة 0.01 بالمئة من الانتشار في عام 2030 وتتحقق فيه نسبة 99.99 بالمئة من الانتشار في عام 2069. ويحدث الانتشار الأقصى عندما يتم استبدال 80 بالمئة من إجمالي عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة لخط الأساس بالقيادة عالية المكننة.

نأخذ بعين الاعتبار مدى احتمال تغير عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة نتيجة لانتشار المركبات عالية المكننة. عقب نمذجة انتشار المركبات عالية المكننة وفقاً للنسبة المئوية لأميلال خط الأساس التي ستقطعها المركبات عالية المكننة. ومن المتوقع على نطاق واسع أن تزيد المركبات عالية المكننة من الأميال المقطوعة لأنها تُخفّض من تكلفة السفر. ويمكنها توفير فرص سفر لذوي الإعاقة الحركية في الوقت الراهن. وتمكين السفر بالمركبات بدون قائد (Anderson et al., 2014; Fagnant and Kockelman, 2015; Bierstedt et al., 2016). وربما تحدث أيضاً تأثيرات معقدة نتيجة استخدام المركبات عالية المكننة المشتركة (على سبيل المثال. سيارات الأجرة عالية المكننة) (Greenblatt and Saxena, 2015) وتحولات الأوضاع الناتجة عن الانتقال. وبالنظر للطبيعة التدميرية للتقنية فإن التأثير النهائي لهذه التغييرات غير معروف.

يتطلب نموذجنا من المستخدم تحديد عدد أميال القيادة عالية المكننة التي تحل محل كل ميل من القيادة البشرية عند حدوث مثل هذا التبديل. وذلك من أجل هذه التغييرات في مطلب السفر. ويتحدد هذا الأمر باستخدام العامل المتغير c . حيث يدل $c = 0$ على استبدال ميل بآخر ولا يوجد تغيير في عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة. ويعني $c > 0$ أن كل ميل بشري مقطوع يحل محله أكثر من ميل بالقيادة عالية المكننة مما ينتج عنه زيادة عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة. ويعني $c < 0$ أن كل ميل بشري مقطوع يستبدل بأقل من ميل من القيادة عالية المكننة. مما يؤدي إلى انخفاض عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة.

إذن يكون إجمالي عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في مستقبل تُستخدم فيه المركبات عالية المكننة. VMT_x . عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة لخط الأساس في السنة x (حسبما هو محسوب في المعادلة 3.1) الذي لم يتم استبداله بالقيادة عالية المكننة، إضافةً إلى عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة لخط الأساس الذي يستبدل بالقيادة عالية المكننة مضروباً في $(1 + c)$. وهذا موضح في المعادلة 4.4:

$$(4.4) \quad VMT_x = VMT_{baseline,x}(1 - M_x) + VMT_{baseline,x}M_x(1 + c_f) .$$

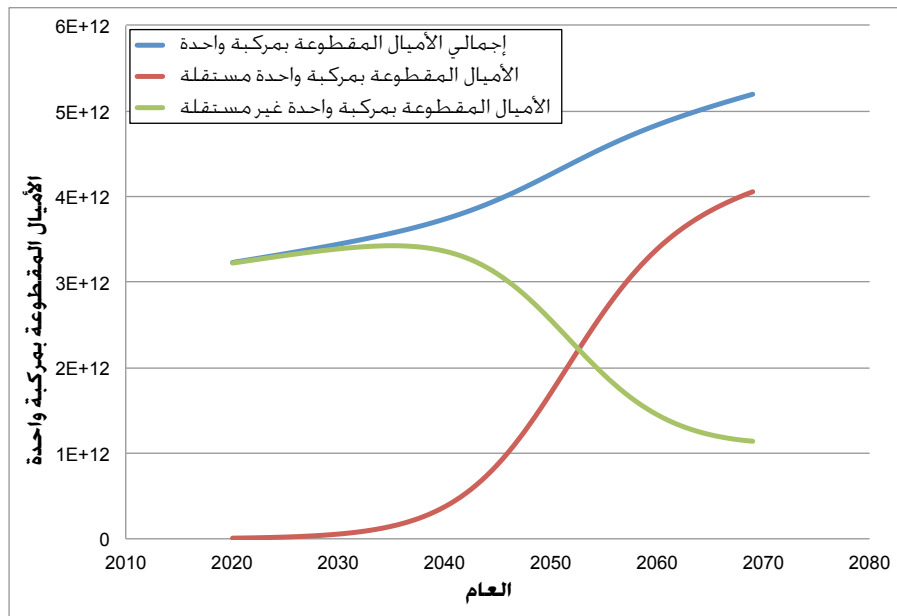
كما هو موضح، فإن عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة عالية المكننة، $VMT_{a,x}$ ، وعدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة غير عالية المكننة، $VMT_{n,x}$ ، في السنة x توضحها المعادلات 4.5 و4.6:

$$(4.5) \quad VMT_{a,x} = VMT_{baseline,x}M_x(1 + c_f)$$

$$(4.6) \quad VMT_{n,x} = VMT_{baseline,x}(1 - M_x) .$$

يوضح الشكل 4.2 إجمالي عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة، وعدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة عالية المكننة، وعدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة غير عالية المكننة، مع افتراض أن المركبات عالية المكننة ستستبدل كل ميل من القيادة غير عالية المكننة بـ 1.2 ميل من القيادة عالية المكننة (على سبيل المثال، $c = 0.2$). يفترض عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة لخط الأساس، في هذا السيناريو وفي الأشكال المتبقية في هذا الجزء، مضاعفة النمو السنوي الذي يبلغ 0.53 بالمئة كما هو موضح في أحد السيناريوهات في الشكل 3.1.

الشكل 4.2. سيناريو عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة عالية المكننة وغير عالية المكننة



ملاحظة: يوضح هذا الشكل عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة بمرور الوقت في ظل سيناريو تحقق فيه نسبة 0.01 بالمئة من انتشار المرحلة عالية المكننة في عام 2030، وتحقيق فيه نسبة 99.99 بالمئة من الانتشار في عام 2069، ويحدث الانتشار الأقصى عندما تكون نسبة 80 بالمئة من عدد الأميال المقطوعة بالمرحلة الواحدة لخط الأساس مُمكنة بدرجة عالية، وتستبدل المركبات عالية المكننة كل ميل خط أساس بـ 1.2 من الأميال عالية المكننة.

معدل سلامة المركبات غير عالية المكننة بمرور الوقت

نفترض أن المركبات غير عالية المكننة سيكون لها معدل الأمان ذاته في ظل مستقبل توجد به مركبات عالية المكننة، كما سيكون الحال في مستقبل لا توجد به مركبات عالية المكننة.¹¹ بمعنى آخر، $s_{n,x} = s_x$ حسبما هو محدد في المعادلة 3.2 في الفصل الثالث. ومع ذلك، سينخفض عدد حوادث السلامة الناجمة عن المركبات غير عالية المكننة عنها في مستقبل خط الأساس، حيث سيكون عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة غير عالية المكننة أقل.

معدل سلامة المركبات عالية المكننة بمرور الوقت

نقوم بنمذجة معدل سلامة المركبات عالية المكننة من خلال عاملي سلامة: التغيير في أحدث تقنيات سلامة المركبات عالية المكننة، والمدى الذي تنتشر به آخر التقنيات من خلال الأسطول الحالي من المركبات عالية المكننة.

التغيير في أحدث تقنيات السلامة في المركبات عالية المكننة

قد تحاكي التغييرات في أحدث تقنيات المركبات عالية المكننة تلك الخاصة بتقنيات المركبات السابقة. في ظل التحسينات التي تحدث تدريجيًا؛ حيث يحسن المطورون التصميمات ويتم إجراء تحسينات تقنية داعمة (كأجهزة الاستشعار الأفضل والأرخص). ولكن خلافًا لتقنيات المركبات السابقة، يمكن أيضًا أن تتطور سلامة المركبات عالية المكننة باستمرار من خلال تجربة القيادة ذاتها. عندما يرتكب سائق بشري خطأً على الطريق، فإن هذا الشخص وحده، بطبيعة الحال، يمكنه التعلم من تلك التجربة لتحسين عادات القيادة لديه. السائقون الآخرون لا يقع عليهم أي أثر. ليس هذا هو الحال مع المركبات عالية المكننة. يستخدم مطورو المركبات عالية المكننة تجربة القيادة للمركبات الخاصة لتطوير أحدث التقنيات في سلامة المركبات عالية المكننة. تقتضي المركبات عالية المكننة من غوغل، بصفتها مثالاً على التحسين، عمليات انفصال بعدد أقل، التي تتم سواء افتضت المركبات عالية المكننة تدخلًا من مسؤول اختبار القيادة، أو أنه يتدخل من تلقاء نفسه من باب حرصه على السلامة. أبلغت غوغل دائرة المركبات الآلية بكاليفورنيا أن المركبات انفصلت مرة كل 600 ميل تقريبًا في الربع الأخير من عام 2014، بيد أن المركبات انفصلت مرة كل 2,800 ميل في الربع الأخير من عام 2015 (Google Auto LLC, 2015).¹² وفي عام 2016 إجمالاً، تراجع هذا العدد لأكثر من ذلك، إلى أن وصل إلى حالة انفصال واحدة كل 5,000 ميل (Waymo, 2016). وكمثال آخر، فقد فعلت تسلا تقنية الرّبان الآلي لأول مرة في مركبات طراز S في تشرين الأول (أكتوبر) 2015، وقامت بترقية البرامج المثبتة المرتبطة بعد ذلك في كانون الأول (ديسمبر) 2015 وفي آب (أغسطس) 2016 لتضم، من بين أمور أخرى، أداء أمان أفضل قائمًا على تجارب المركبات الحالية (تسلا، غير مؤرخ). تُطلق تسلا على هذا "التعلم الجماعي للأسطول" ويعني أن يكون لأي أسطول مركبات القدرة على التعلم من تجارب عدد قليل من المركبات.

قد توجد مكاسب سريعة فيما يخص الأداء في الأميال المقطوعة في البداية بالنسبة للمركبات عالية المكننة، كما هو الحال في العديد من مواقف التعلم الأخرى، عندما يكون هناك مجال كافٍ للتطوير مما هو عليه في الأميال

¹¹ قد يتغاضى التفسير المستقبلي لنموذج سلامة المركبات المُمكنة عن هذا الافتراض ويُقدّم مدخلاً آخر للمستخدم، على سبيل المثال، يمكن للمرء أن يتخيل أن القيادة البشرية ربما تكون أسوأ في مستقبل تُستخدم فيه مركبات عالية المكننة على نطاق واسع؛ لأن مهارات القيادة والانتباه لدى الإنسان قد تقل. على الجانب الآخر، ربما تصبح المركبات غير عالية المكننة أكثر أمانًا باستخدام تقنيات مثل الاتصال بين المركبات، الأمر الذي من شأنه أن يكون أكثر فاعلية في مستقبل توجد به مركبات عالية المكننة.

¹² وتعكس مرات الانفصال التي أشارت إليها غوغل الحالات التي اكتشف فيها برنامج المركبة عالية المكننة عطلًا تقنيًا، وحولت زمام التحكم إلى مشغّل بشري، أو أن المشغّل تولى زمام التحكم لضمان التشغيل الآمن للمركبة. توجد قيود على استخدام حالات الانفصال باعتبارها مقياسًا للسلامة؛ إذ لا تتضح معايير الخطر المطبقة سواءً كانت متماثلة على مستوى جميع المطورين أو مسؤولي اختبار القيادة.

المقطوعة لاحقًا. حيث تشهد مجالات التحسين المتبقية صعوبة أكبر في تحديدها وتحقيقها. تُستخدم دوال القوى والدوال الأسية غالبًا في نمذجة هذا النوع من التعلم (السريع في البدء، البطيء فيما بعد) (Newell and Rosenbloom, 1980) كما استُخدمت على نطاق واسع في نمذجة التقدم التقني (Nagy et al., 2013). نقوم هنا بنمذجة أحدث معدل للسلامة $R(t)$ بعد أن قطعت المركبات عالية المكننة t أميالًا تراكمية باعتبارها منحني اضمحلال أسّي. نستخدم منحني اضمحلال: حيث ينخفض معدل الوفيات من معدل أولي عند وقت الطرح إلى معدل مستقبلي.

توضح المعادلة 4.7 منحني اضمحلال أسّي قياسي:

$$(4.7) \quad N(t) = e^{-t} .$$

يمكننا نمذجة $R(t)$ بدالة اضمحلال الأسّي القياسي بالتدرّج على طول محور x لوصف الأميال التراكمية المقطوعة. وعلى طول محور y لوصف الأداء من حيث أحدث التقنيات في معدلات سلامة المركبات عالية المكننة المتعلقة بمعدل سلامة أحد المعايير المبدئية المعيّنة للمقارنة المرجعية بالمركبات غير عالية المكننة. تتطلب نمذجة $R(t)$ بهذه الطريقة تحديد ثلاثة عوامل متغيرة:

- R_I . يتعلق معدل السلامة الأولي بالمركبات عالية المكننة بمعدل المعيار المعيّن للمقارنة المرجعية بالمركبات غير عالية المكننة¹³
- R_F . يتعلق أفضل معدل سلامة للمركبات عالية المكننة بمعدل المعيار المعيّن للمقارنة المرجعية بالمركبات غير عالية المكننة
- b . النسبة المئوية للتحسين المنجز بعد قطع t_b أميال.

وهذا يؤدي بنا إلى الدالة التالية الخاصة بـ $R(t)$:

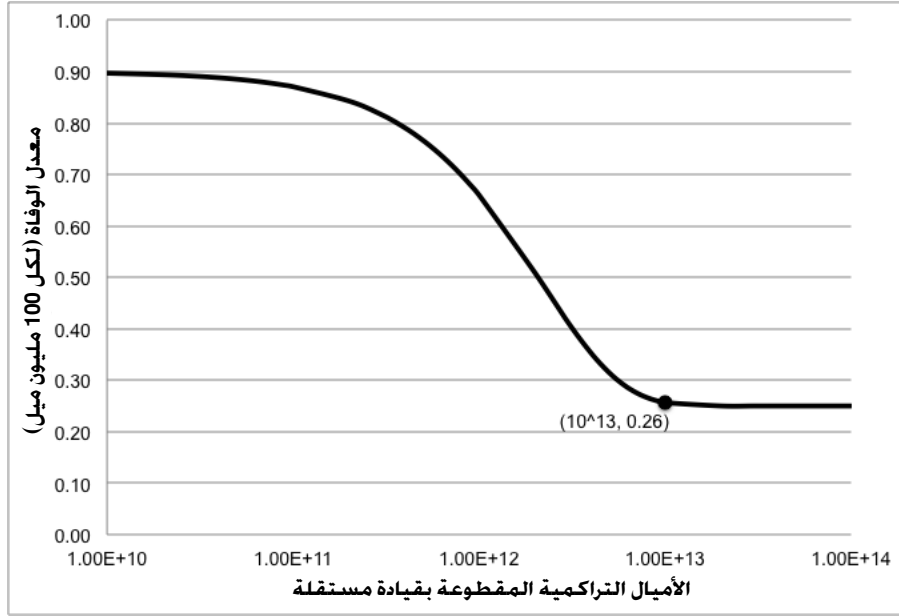
$$(4.8) \quad R(t) = R_F + (R_I - R_F) e^{-t \left(\frac{-\ln(1-b)}{t_b} \right)} .$$

نعرّف في هذه الدراسة معدل الوفيات حسب المعيار المعيّن للمقارنة المرجعية على أنه المعدل الحالي للسائقين البشر في الولايات المتحدة (1.12 حالة وفاة كل 100 مليون ميل في 2015؛ انظر الإدارة الوطنية للسلامة على الطرق السريعة، 2016a).¹⁴ يوضح الشكل 4.3 معدل الوفيات الناجم عن المركبات عالية المكننة المتعلقة بمعدل المعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية للمركبات غير عالية المكننة. بافتراض أن المعدل الأوّلي يبلغ 1.5 مرة من المعيار المعيّن للمقارنة المرجعية، والمعدل النهائي 0.5 مرة من المعيار المعيّن للمقارنة المرجعية، ويقطع 10 تريليونات ميل لبلوغ 99 بالمئة من التحسين من 0.9 إلى 0.25. هنا تكون. $0.25 = R_F$ ، $0.9 = R_I$ ، $t_b = 10^{13}$ ، $b = 0.99$.

¹³ هذه كمية بدون وحدة، وتوضح النسبة المئوية لحوادث السلامة (على سبيل المثال، الوفيات والإصابات وحوادث الاصطدام) التي تقع كل ميل تقطعه المركبات عالية المكننة مقابل المركبات غير عالية المكننة.

¹⁴ أصدرت الإدارة الوطنية للسلامة المرورية على الطرق السريعة، في تشرين الأول (أكتوبر) 2017 قبيل نشر هذه الدراسة، بيانات السلامة المرورية لعام 2016 وراجعت تقديرات 2015. وأفادت الإدارة الوطنية للسلامة المرورية على الطرق السريعة أنّ معدل الوفيات، في عام 2016، ارتفع إلى ما يزيد عن 1.18 حالة وفاة كل 100 مليون ميل مقطوع بالمركبة الواحدة، أكثر من معدل (تمت مراجعته) يبلغ 1.15 حالة وفاة كل 100 مليون ميل مقطوع بالمركبة الواحدة في 2015 (الإدارة الوطنية للسلامة المرورية على الطرق السريعة، 2017). الأرقام الواردة في هذه الدراسة تعتمد على التقدير السابق في 2015.

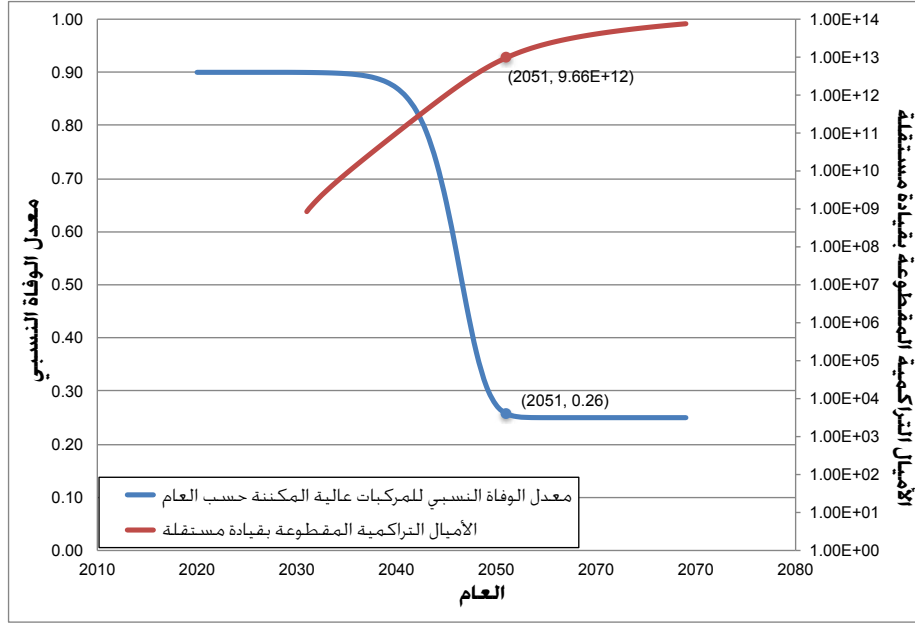
الشكل 4.3. سيناريو معدل الوفاة النسبي للمركبات عالية المكننة كدالة للأميال التراكمية المقطوعة بمركبات عالية المكننة



ملاحظة: يفترض هذا الشكل أن معدل الوفاة الأولي للمركبة عالية المكننة يعادل 0.9 من معدل الوفاة للمركبات غير عالية المكننة (1.12 من الوفيات لكل 100 مليون ميل). وأن المعدل النهائي يبلغ 0.25 من معدل المعيار المعين للمقارنة المرجعية، ويتطلب 10 تريليونات ميل من القيادة لتحسُّن بنسبة 99 بالمئة من 0.9 إلى 0.25.

يوضح الشكل 4.4 معدل الوفاة النسبي بمرور الوقت. مع مراعاة عدد الأميال المقطوعة تراكميًا بمركبات عالية المكننة، وذلك استنادًا إلى عدد الأميال المقطوعة بمركبة واحدة عالية المكننة سنويًا الموضح في الشكل 4.2. وهو يُبين كيف أن 99 بالمئة من تحسين الأداء (ما يعني معدل وفاة نسبي يبلغ 0.26) سيتحقق في عام 2051 بعد أن تقطع المركبات عالية المكننة 10 تريليونات ميل تقريبًا.

الشكل 4.4. سيناريو معدل الوفاة النسبي للمركبات عالية المكننة والأميال التراكمية المقطوعة بمركبات عالية المكننة بمرور الوقت



ملاحظة: يعرض هذا الشكل تقديرات لجميع المعلمات المستخدمة في الأشكال السابقة.

انتشار أحدث التقنيات في سلامة المركبات عالية المكننة

أحد العوامل التي تؤثر على السلامة في المستقبل هو إذا ما كان أداء السلامة للمركبات عالية المكننة الحالية سيتحسن مع تحسُّن أحدث تقنيات المركبات عالية المكننة. ويعد تحسين سلامة المركبات التي تم طرحها بالفعل أمرًا صعبًا بالنسبة إلى السيارات التقليدية؛ لأن تحسينات السلامة تتضمن عادةً تحسينات على التصميم المادي للمركبات. أُجريت هذه التحسينات بشكل عام على الإصدارات الجديدة لا الموجودة حاليًا. لذلك تتحقق التحسينات بشكل أساسي عندما يشتري المستهلكون سيارات جديدة ويستغنون عن القديمة.¹⁵ وعلى النقيض، فإنه من الممكن إجراء تحسينات السلامة على مستوى مجموعات كبيرة من أسطول المركبات عالية المكننة الموجود بالخدمة. ليس فقط من خلال استبدال المركبة، بل أيضًا من خلال ترقية أداء البرمجيات وهو ما يمكن إجراؤه عن بُعد، ومن ثمّ بشكل متكرر. وقد بدأ بعض صانعي السيارات بالفعل بتزويد أنظمة مساعدة السائق والمركبات عالية المكننة بتحديثات عبر الهواء (Zhang, 2016) ومن المتوقع أن تصبح هذه سمة موحدة في المستقبل (ABI Research, 2016).¹⁶

يمكننا اكتشاف أثر تحسينات أداء السلامة (من خلال كل من معدل دوران المركبات والترقيات) في أسطول المركبات عالية المكننة من خلال حساب حالتين مختلفتين. في الحالة الأفضل، سيتم تحسين أسطول المركبات عالية المكننة

¹⁵ هناك استثناء عندما تكون هناك عمليات سحب من السوق؛ حيث يتم فيها تحسين سلامة مجموعات كبيرة من الأسطول التقليدي (على سبيل المثال سحب وسادة هواء Takata من السوق). يُعالج السحب من الأسواق عمومًا أوجه القصور في الوظيفة الأساسية للمركبة. ويُحسن بصورة عامة من سلامة الأسطول بشكل طفيف جدًا؛ لأن المخاطر التي تنطوي على عمليات السحب هي عمومًا مخاطر ضئيلة جدًا. فوسادات هواء Takata المعيبة على سبيل المثال موجودة في أكثر من 40 مليون سيارة. وأدى هذا العيب إلى 11 حالة وفاة اعتبارًا من 4 كانون الثاني (يناير) 2017 (Consumer Reports, 2017).

¹⁶ لم ندمج تعلم أنظمة مساعدة السائق في نمذجة أداء سلامة المركبات غير عالية المكننة (أي المستويين 1 و2 من استقلالية القيادة) لأنه يمكن تطوير تقنيات السلامة هذه، في معظم الحالات، على نحو ملائم في بيئات المختبر، لذا قد تكون تحسينات السلامة من حيث البرمجيات فقط أقل فرصًا وأثرًا.

بالكامل للحصول على أداء سلامة متطور. ويمكن أن يحدث هذا إن استبدلت المركبات بشكل متكرر، أو إذا تم تحسينها باستمرار أثناء استعمالها، أو كليهما. وفي الحالة الأسوأ، نفترض عدم وجود تحسينات سلامة؛ لأنه بمجرد سير المركبة عالية المكننة على الطريق فإنها تبقى في الخدمة إلى أجل غير مسمى ولن تتحسن سلامتها أبدًا¹⁷ والمستقبل يقع في مكان ما بين هذا الأمر وذلك، ويمكننا اكتشاف تأثيرات مستوى تحسين الأسطول من خلال استنتاج القيمة الأوسط بينهما.

وتماشياً مع المعادلات السابقة، فإنه يمكننا استخدام المتغيرات التالية:

- $VMT_{a,x}$ ، وهو عدد الأميال التي قطعتها مركبات عالية المكننة في سنة x . كما هو محدد في المعادلة 3.1
- H ، وهو معدل سلامة المركبة غير عالية المكننة المستخدم كمعيار معين للمقارنة المرجعية
- Rx ، وهو معدل سلامة المركبات عالية المكننة المتطورة التي طُرحت في الأسواق في السنة x وذلك نسبياً إلى معدل السلامة المستخدم كمعيار معين للمقارنة المرجعية (وهو يُرمز إليه في المعادلة 4.8 بالرمز $R(\sum_{i=0}^x M_i)$)
- $f_{a,x}$ ، وهو إجمالي الحوادث المتعلقة بالسلامة في السنة x للمركبات عالية المكننة.

في ضوء هذه المتغيرات، نجد أن عدد الحوادث التي سببتها المركبات عالية المكننة عند افتراض إجراء تحسينات مثالية على الأسطول هو

$$(4.9) \quad f_{a,x,perfect} = HR_x M_x .$$

إجمالي عدد الحوادث بدون تحسينات للأسطول الحالي يساوي عدد الحوادث في السنة السابقة (F_{x-1}) بالإضافة إلى ناتج الأميال الإضافية المقطوعة في العام الحالي المنسوبة إلى طرازات مركبات جديدة، ($VMT_{a,x} - VMT_{a,x-1}$) ومعدل سلامة التقنيات الحديثة لطرازات المركبات الجديدة (HR_x) (المعادلة 4.11):

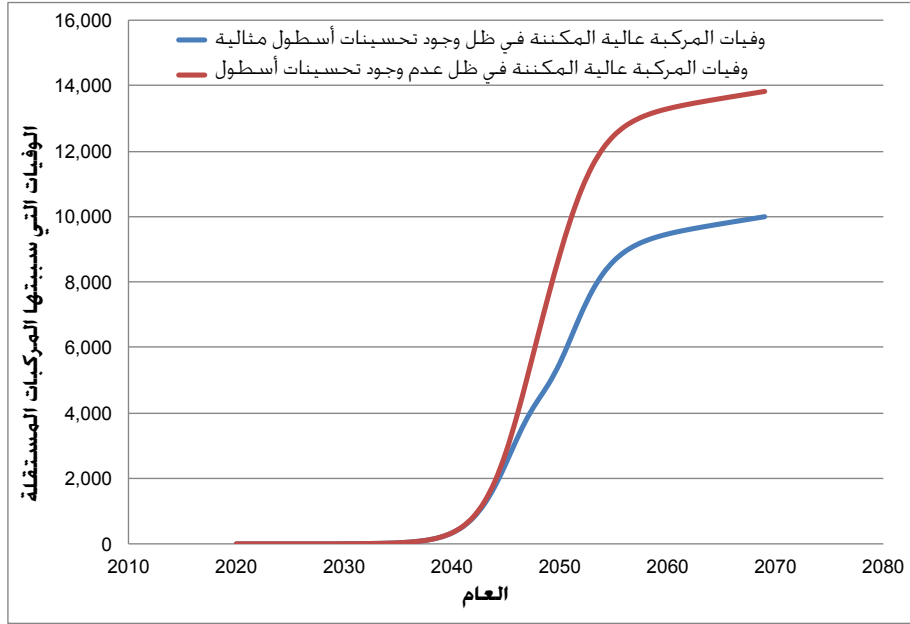
$$(4.10) \quad F_{a,2020,none} = HR_{2020} M_{2020}$$

$$(4.11) \quad F_{a,x,none} = F_{x-1} + (VMT_{a,x} - VMT_{a,x-1}) HR_x .$$

يبين الشكل 4.5 وفيات المركبات عالية المكننة سواء مع التحسينات المثالية للأسطول وبدونها تحت نفس افتراضات السيناريو في الأشكال السابقة. تتسبب المركبات عالية المكننة في عدد وفيات يبلغ تقريباً 10,000 وفاة بحلول العام 50، وذلك في حالة وجود تحسينات مثالية على الأسطول. وفي حالة الأسطول بلا تحسينات بلغت وفيات المركبات عالية المكننة ما يقرب من 13,800 حالة وفاة بحلول العام 50. أو حوالي 3,800 حالة وفاة أخرى سنوياً، وعلى مدار الخمسين عامًا المحاكية يُترجم الفارق في هذين السيناريوهين إلى ما يقرب من 83,000 حالة وفاة أقل في حالة إجراء التحسينات المثالية على الأسطول.

¹⁷ فالسيناريو القائل بانعدام تحسينات الأسطول هو سيناريو مستحيل من الناحية العملية، لأنه سيتم الاستغناء عن المركبات عالية المكننة واستبدالها بطرازات مركبات جديدة، حتى لو لم يتم ترقيتها أبداً أثناء فترتها بالخدمة. لذلك، من الأفضل النظر إلى هذه الحالة على أنها أمر حسابي مفيد، وأنها ليست أمراً معنياً بالمستقبل الفعلي لتحسين الأسطول.

الشكل 4.5. الوفيات الناجمة عن المركبات عالية المكننة مع التحسين المثالي أو بدون تحسين للأسطول



ملاحظة: يعرض هذا الشكل تقديرات لجميع المعلمات المستخدمة في الأشكال السابقة.

ستكون عملية تحسين الأسطول الفعلية ضمن هذه النطاقات. سيتم تحسين الأسطول بعض الشيء بسبب ترقية البرمجيات ومعدل الدوران بين صفوف المركبات عالية المكننة. ومع ذلك، لا تستطيع المركبات عالية المكننة الأقدم مسايرة أحدث الطرازات إلى أجل غير مسمى؛ لأن بعض التحسينات، على سبيل المثال، ستتضمن بعض التغييرات على الأجهزة الحاسوبية التي لا يمكن تعديلها. يعد هذا الحل الوسط غير مؤكد، لكن يمكن اكتشافه من خلال تقدير حوادث السلامة في سنة معينة بين الحدود القصوى من خلال بعض التقدير w بين 0 و1. كما هو موضح في المعادلة 4.12:

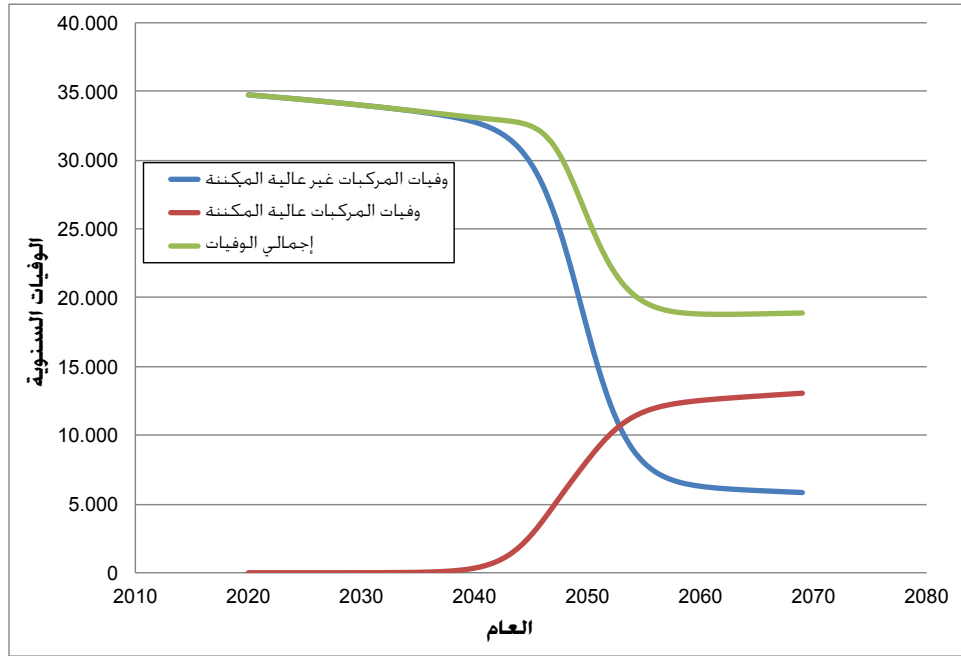
$$F_{a,x} = wF_{a,x,perfect} + (1 - w)F_{a,x,none} \quad (4.12)$$

بالتالي يمكن تحديد معدل السلامة في مستقبل يوجد به مركبات عالية المكننة رقميًا كما يلي

$$S_{a,x} = \frac{F_{a,x}}{VMT_{a,x}} \quad (4.13)$$

يوضح الشكل 4.6 إجمالي الوفيات في مستقبل يوجد به مركبات عالية المكننة، على افتراض أن مقدار تحسين الأسطول w يبلغ 0.2.

الشكل 4.6. إجمالي الوفيات في مستقبل توجد به مركبات عالية المكننة



ملاحظة: يعرض هذا الشكل تقديرات لجميع المعلومات المستخدمة في الأشكال السابقة.

استكشاف النموذج وتوضيحه

يتيح نموذج سلامة المركبات المُمكنة للمستخدمين معرفة الآثار المتنوعة المحتملة للانتشار والتعلم وسمات سلامة المركبات الأخرى بمرور الوقت. للتوضيح نستكشف الوفيات في مستقبل توجد به مركبات عالية المكننة وفق ثلاثة سيناريوهات مختلفة لانتشار المركبات عالية المكننة وأدائها. حسبما تحدده المعلومات في الجدول 5.1. تهدف تلك السيناريوهات بدقة إلى توضيح كيف يمكن استخدام النموذج لمقارنة الافتراضات. ويجب ألا تُفسر على أنها توقعاتنا لكيفية توضيح مستقبل السلامة على الطرق للعيان.

الجدول 5.1. المعلومات في ثلاثة سيناريوهات لمركبة عالية المكننة

مدخل المستخدم	المتغير	السيناريو 1: أسوأ من المعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية	السيناريو 2: أفضل من المعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية	السيناريو 3: مثالي تقريباً
في أي عام يتحقق معدل انتشار بنسبة 0.01٪؟	$x_{0.02}$	2025	2035	2045
في أي عام يتحقق معدل انتشار بنسبة 99.99٪؟	$x_{0.98}$	2055	2065	2075
في مستقبل توجد به مركبات عالية المكننة، ما النسبة المئوية القصوى لأميلال خط الأساس التي ستقطعها تلك المركبات عالية المكننة؟	A_{max}	٪80	٪80	٪80
ما المقدار الذي سيتغير به عدد الأميال المقطوعة بمركبة واحدة عالية المكننة كنتيجة لاستخدام مركبة عالية المكننة؟	c	٪10	٪10	٪10
ما معدل الوفيات الأولي لمركبة عالية المكننة مقارنة بالمعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية؟	R_i	1.2	0.8	0.2
ما معدل الوفيات النهائي (أي الأفضل) لمركبة عالية المكننة مقارنة بالمعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية؟	R_f	0.2	0.2	0.2
كم عدد الأميال المطلوبة للوصول إلى انخفاض بنسبة 99٪ في المعدل؟	$t_{0.99}$	1 ترليون	1 ترليون	1 ترليون
كيف يمكن ترقية أسطول المركبات عالية المكننة الحالي؟	w	0.5	0.5	0.5

يعكس مستقبل خط الأساس بدون مركبات عالية المكننة معدل نمو سنوي مُركَّب تبلغ نسبته 0.6 بالمئة، مع انخفاض نسبته 30 بالمئة في معدل الوفاة مقارنة بالمعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية (أي أن معدل الوفاة يبلغ 0.784 لكل 100 مليون ميل). يوضح السيناريو الأول لمركبة عالية المكننة مستقبلاً يتم فيه اعتماد المركبات عالية المكننة مبكراً، قبل أن تصل إلى تكافؤ الأداء مع المركبات غير عالية المكننة. يوضح السيناريو الثاني مستقبلاً يتم فيه اعتماد المركبات عالية المكننة في المدى المتوسط، بمجرد أن يكون أدائها أفضل من المركبات غير عالية المكننة الحالية. يوضح السيناريو الثالث مستقبلاً يتم فيه اعتماد المركبات عالية المكننة في وقت لاحق، بمجرد أن تكون أكثر أماناً بشكل كبير من المركبات غير عالية المكننة الحالية. تختلف هذه السيناريوهات في توقيت الانتشار والأداء في وقت الانتشار، لكننا أبقينا أكبر قدر ممكن من المعلومات الأخرى ثابتاً عبر السيناريوهات، مثل زيادة في عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة كنتيجة لاستخدام مركبة عالية المكننة وقابلية ترقية الأسطول.

قد تكون هذه السيناريوهات نتيجة لاختلاف اللوائح التنظيمية (على سبيل المثال: استعداد الحكومة للسماح للمركبات عالية المكننة على مستويات مختلفة من أداء السلامة)، أو تفضيلات المستهلكين (على سبيل المثال: رغبة المستهلك في استخدام المركبات عالية المكننة على المستويات المختلفة لأداء السلامة)، أو عوامل أخرى (مثل: رغبة المطور في تقديم تقنية على مستويات الأداء المختلفة). ليس الهدف من هذا الرسم التوضيحي تقييم طريقة ظهور السيناريوهات. لكن الهدف يتمثل في طريقة قيام نموذج سلامة المركبات المكننة بحساب التأثير على نتائج السلامة على الطريق في حالة حدوث السيناريوهات.

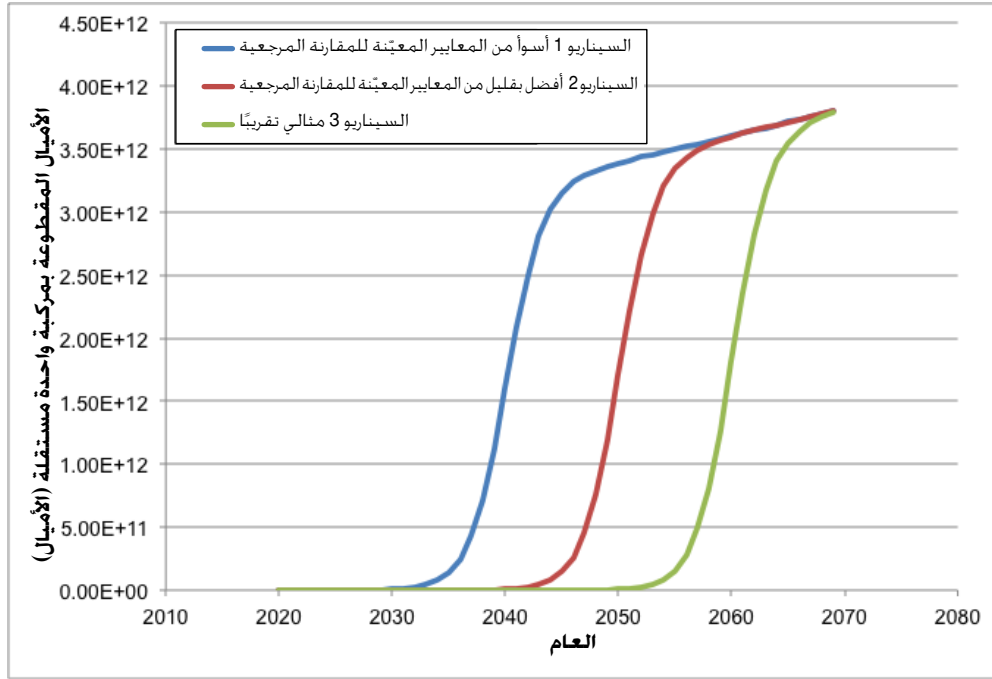
توضح الأشكال 5.1 و5.2 و5.3 طريقة استخدام الطراز لفهم النتائج ومقارنتها في سيناريوهات مختلفة. يوضح الشكل 5.1 الاختلافات في توقيت انتشار المركبات عالية المكننة من بين ثلاثة سيناريوهات لمركبة عالية المكننة، موضحة بعدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة سنويًا بمرور الوقت. يوضح الشكل 5.2 الاختلافات في أحدث الأساليب المستخدمة في معدلات الوفاة لمركبة عالية المكننة من بين السيناريوهات الثلاثة؛ حيث يوضح أن معدل الوفيات الناجمة عن مركبات عالية المكننة مقارنة بالمعدل المعياري لحالات الوفيات الناجمة عن السائق البشري (1.12 حالة وفاة لكل 100 مليون ميل). توضح هذه الأشكال أنه رغم ضعف السلامة الأولية للمركبات عالية المكننة في السيناريو 1، إلا أن الانتشار الأولي يتيح تحسن السلامة بسرعة، وتتطور أداء السلامة بخطى سريعة في السيناريوهين 2 و3.

يوضح الشكل 5.3 أن السيناريوهين 2 و3 على حد سواء يقللان معدل الوفيات كل عام مقارنة بمستقبل خط الأساس، وعلى مدار 50 عامًا، ويحققان انخفاضًا صافيًا في الوفيات بمعدل 390,000 و190,000 على التوالي. إن إنقاذ السيناريو 2 لحياة الكثيرين بدرجة أكبر من السيناريو 3 لا يمثل مفاجئة؛ لأنه من المفترض بدء عمليات الإنقاذ في مرحلة مبكرة، مما يسمح بحدوث الانتشار واسع النطاق لتقنية إنقاذ الحياة في وقت أقرب، على النقيض من ذلك، يزيد السيناريو 1 من فقدان الأرواح في السنوات الأولى، ولو بمقادير بسيطة. مع ذلك، وعلى مدى فترة الخمسين سنة هذه، ينقذ هذا السيناريو معظم الأرواح بوجه عام؛ أي ما مجموعه 596,000. لأنه يحقق أداءً أفضل في وقت أقرب مما هو عليه في السيناريوهات الأخرى من خلال التعلم.¹⁸

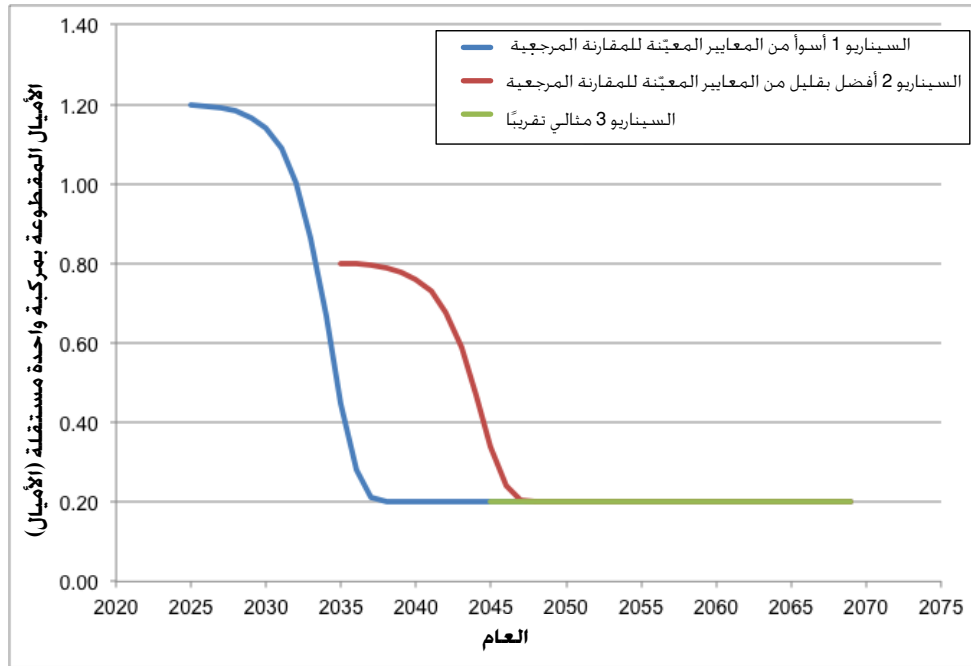
لا يشير هذا الرسم التوضيحي إلى أن الانتشار المبكر للتقنية الأقل أداءً سوف يتضح كما هو الحال في هذا السيناريو، أو أن أيًا من هذه السيناريوهات سيحدث بالفعل. وكبعض مثال واحد نعرضه، يمكن أن تؤدي ردود فعل الجمهور الغاضبة في حالة حدوث اصطدام كبير إلى تأخر اعتماد التقنية، ويتمثل الهدف هنا بدلاً من ذلك في إظهار الكيفية التي يمكن بها للمستقبل أن يتضح بطرق معقدة ومهمة لا تكون واضحة عند توجيه الانتباه إلى السلامة فقط في وقت طرح المركبات عالية المكننة. قد تثير هذه المعلومات استفسارات تتعلق بالسياسات، مثل طريقة صياغة السياسات للبحث على التعلم السريع أو طريقة إجراء المقاضلات بين المخاطر الطفيفة على المدى القصير التي قد تؤدي إلى مكاسب كبيرة على المدى الطويل.

¹⁸ ومع ذلك، سجل السيناريو 1 ارتفاعًا طفيفًا في المعدل السنوي للوفيات عن السيناريوهين الآخرين. في السنوات القليلة الماضية، ويرجع ذلك إلى أنه مع أن كلاً من عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة وأحدث التقنيات في أداء سلامة المركبات عالية المكننة هي نفسها في كل حالة، فإن الأسطول لم يخضع للتطوير التام، كما أن بعض المركبات عالية المكننة القديمة ذات الأداء الضعيف لا تزال في الخدمة.

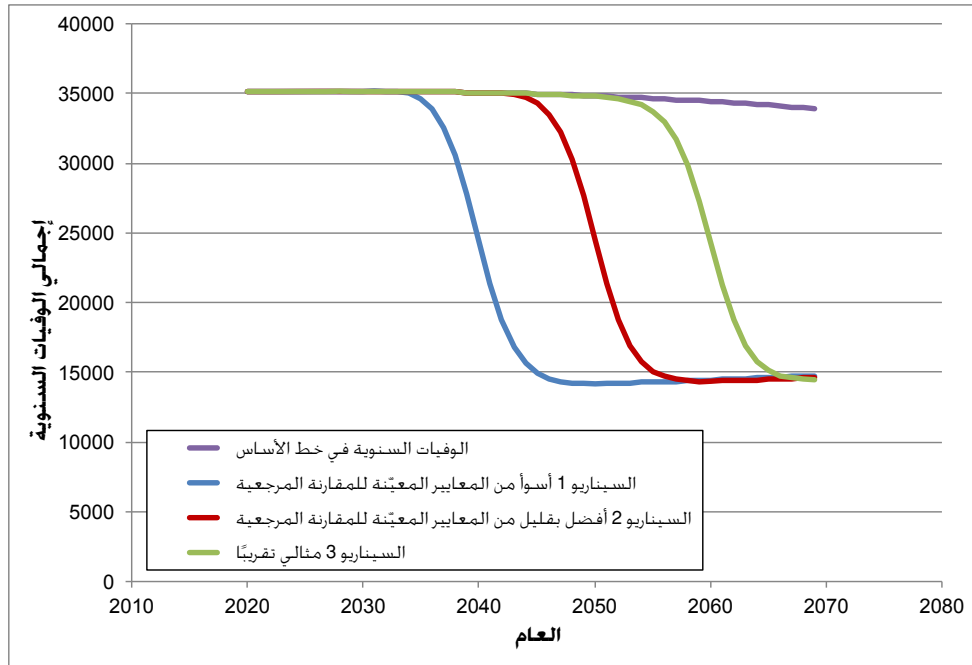
الشكل 5.1. عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة عالية المكننة في ثلاثة سيناريوهات



الشكل 5.2. أحدث معدل للوفيات الناجمة عن المركبات عالية المكننة نسبة إلى معدل المعايير المعيّنة للمقارنة المرجعية في ثلاثة سيناريوهات



الشكل 5.3. الوفيات السنوية في مستقبل خط أساس بدون المركبات عالية المكننة وفي ثلاثة سيناريوهات للمركبات عالية المكننة



توثق هذه الدراسة نموذجًا بسيطًا لتأثير انتشار المركبات عالية المكننة وتحسين السلامة على الطرق بمرور الوقت مقارنةً بمستقبل بدون مركبات عالية المكننة على أساس افتراضات المستخدم بشأن مجموعة متنوعة من العوامل الرئيسية. نموذج سلامة المركبات المُمكّنة غير محدد بشأن طريقة تحديد السلامة على الطرق، ويمكن تثبيته لتقدير الوفيات أو الإصابات أو حوادث الاصطدام أو المقاييس الأخرى للسلامة على الطرق. لا يشتمل نموذج سلامة المركبات المُمكّنة على جميع العوامل والعلاقات المعقدة التي قد تُحدد سلامة المركبات عالية المكننة. وفي المقابل، من المخطط أن يكون أساسًا للبحث الذي يَمَكِّن المستخدمين من توسيع فهمهم لسلامة المركبات عالية المكننة من البداية وبمرور الوقت.

يتبنى النموذج المدخلات التالية المحددة من قبل المستخدم، والتي تكون غير مؤكدة ويمكن تشكيلها من خلال العوامل الاجتماعية والاقتصادية والفنية والسياسية:

- **الزيادة في عدد الأميال المقطوعة بالمركبة الواحدة في مستقبل خط أساس بدون المركبات عالية المكننة.** يمكن تشكيل هذا المدخل من خلال النمو الاقتصادي والتغيرات في التركيبة السكانية وغيرها من العوامل الاقتصادية الاجتماعية. كما يمكن تشكيله من خلال السياسات، مثل الضرائب المفروضة على الوقود، أو وجود السياسات لإدارة الطلب على النقل أو انعدامها.
- **التغيير في معدل سلامة المركبات غير عالية المكننة.** يمكن تشكيل هذا المدخل بالابتكار في أنظمة مساعدة السائق المتقدمة وتقنيات المركبات الأخرى، وتغييرات أنظمة النقل، مثل صيانة الطرق، والأهم من ذلك، التغييرات في السلوكيات، مثل التغييرات في استخدام حزام الأمان أو القيادة المشتتة أو القيادة تحت تأثير الكحول.
- **توقيت انتشار المركبات عالية المكننة ونطاقه.** سيتم تشكيل هذا المدخل من خلال الخيارات التنظيمية، مثل إذا ما كان ينبغي وضع معايير أداء خاصة بالسلامة للمركبات عالية المكننة وماهية معايير الأداء هذه، وإقبال وتفضيلات الجمهور على التقنية، واستعداد المطورين لطرح هذه التقنيات.
- **تأثير المركبات عالية المكننة على الطلب على النقل.** يُتوقع زيادة هذه المدخل عمومًا لأن المركبات عالية المكننة تقلل من تكلفة القيادة، وتخلق فرصًا جديدة لوسائل النقل بين هؤلاء الذين يفتقرون إلى تلك الوسائل في الوقت الراهن. ومع ذلك، فإن هذا أيضًا يمكن صياغته من خلال السياسات، كتلك التي تدير الطلب على النقل أو التي تربط المركبات عالية المكننة بالانتقال، فضلًا عن مدى توفر التنقل كخدمة في اقتصاد مشترك.
- **خصائص السلامة بالمركبات عالية المكننة.** يتضمن هذا المدخل سلامة المركبات عالية المكننة في وقت الطرح، وفي وقت الحد الأعلى للانتشار، بالإضافة إلى معدل التعلم الذي يَمَكِّن من حدوث انتقال بين نقاط النهاية هذه، وهذه ستكون دالة ليس فقط للتقنية، ولكن كذلك للسياسات التي تشجع على مشاركة البيانات التي يمكن أن ترفع من معدلات التعلم أو تعوق ذلك.
- **قابلية ترقية المركبات عالية المكننة.** سيتم تشكيل هذا المدخل بالمدى الذي تحل فيه التحسينات في المعدات مقارنةً بالبرامج، ومن خلال متطلبات السياسات (إن وُجدت) لإثبات الأداء قبل إجراء الترقيات.

وباستخدام هذه المدخلات، يحتسب نموذج سلامة المركبات المُمكنة التغييرات في عدد الأُميال المقطوعة بالمركبة الواحدة، ومعدلات السلامة بمرور الوقت، بما يتيح توفير خطوط زمنية لحوادث السلامة السنوية (مثل الوفيات أو الإصابات) وحوادث السلامة التراكمية في إطار سيناريوهات مستقبلية مختلفة. ويمكن أن تساعد النتائج في إعلام الجمهور ونقاش السياسات العامة بشأن الكيفية التي ينبغي بها طرح المركبات عالية المكننة وتحسينها واعتمادها.

نمذجة الانتشار باستخدام دالة لوجستية

يصف هذا الملحق كيفية استخدام الدالة اللوجستية القياسية في نمذجة انتشار المركبات عالية المكننة بمرور الوقت. كما هو موضح في الفصل الثاني. توضح الدالة اللوجستية القياسية بالمعادلة 3.1 وتتراوح من $(-\infty, 0)$ إلى $(0, \infty)$. ويجب تحويلها على المحور الأفقي لتوضيح الوقت. محددة بالسنوات بداية من اليوم. وعلى المحور الرأسي لتوضيح الانتشار. محددًا بالأميال التي تقطعها المركبات عالية المكننة.

نحوّل أولاً المحور الأفقي. نختار أي نقاط على دالة الانتشار الخاصة بنا (x_a, a) و $(x_{1-a}, 1-a)$ حيث تمثل xa العام الذي اختاره المستخدم والذي حدث فيه نسبة مئوية ما a من إجمالي انتشار المركبات عالية المكننة. وتمثل x_{1-a} العام الذي اختاره المستخدم والذي حدث فيه نسبة مئوية ما $(1-a)$ من إجمالي انتشار المركبات عالية المكننة. وذلك أينما كان $0 < a < 1$ ¹⁹ ويمكن تحويل النقطتين (x_a, a) و $(x_{1-a}, 1-a)$ خطيًا إلى (x'_a, a) و $(x'_{1-a}, 1-a)$ وفقًا للدالة اللوجستية القياسية عن طريق حل المعادلتين التاليتين:

$$(A.1) \quad x'_a = mx_a + b$$

$$(A.2) \quad x'_{1-a} = mx_{1-a} + b .$$

وبإيجاد قيمة m و b نحصل على

$$(A.3) \quad m = \left(\frac{x'_{1-a} - x'_a}{x_{1-a} - x_a} \right)$$

$$(A.4) \quad b = x'_a - mx_a .$$

وكذلك يمكننا إيجاد قيمة كل من x'_a و x'_{1-a} عن طريق أخذ معكوس الدالة اللوجستية:

$$(A.5) \quad x = -\ln \left(\frac{1-f(x)}{f(x)} \right) .$$

وبسبب تناظر الدالة اللوجستية القياسية، فيمكن تبسيط ذلك إلى

$$(A.6) \quad m = \frac{2 \ln \left(\frac{1-a}{a} \right)}{x_{1-a} - x_a}$$

$$(A.7) \quad b = -\ln \left(\frac{1-a}{a} \right) - mx_a .$$

¹⁹ لا يمكننا اختيار $a = 0$ أو $a = 1$ لأن الدالة اللوجستية القياسية لها محورا تقارب أفقيان عند 0 و1.

ثم بعد ذلك نُحوّل المحور الرأسي. يجب تدريج المحور (وليس تحويله) من النطاق $0 < f(x) < 1$ إلى $0 < f(x) < A_{max}$. حيث تمثل A_{max} أكبر نسبة مئوية للأميال المقطوعة بمركبة واحدة لخط الأساس التي ستقطعها المركبات عالية المكننة في سنة واحدة.

تأتي الدالة الناتجة للنسبة المئوية للأميال خط الأساس التي ستحل محلها القيادة عالية المكننة في العام x محددة بواسطة المعادلة A.8:

$$(A.8) \quad f(x) = \frac{A_{max}}{1 + e^{-(mx+b)}} .$$

نمذجة التعليم بدالة اضمحلال أسّي

يصف هذا الملحق كيفية استخدام دالة الاضمحلال الأسّي لنمذجة أحدث تقنيات السلامة في المركبات عالية المكننة كدالة لعدد الأميال التي تقطعها المركبات عالية المكننة. كما ورد في الفصل الرابع. تصف المعادلة 4.7 دالة الاضمحلال الأسّي ويتراوح نطاقها من (0, 1) إلى (0, ∞). ويجب تحويلها على المحور الأفقي لعكس التجربة. المُحدّدة كأميال مقطوعة بالمركبات عالية المكننة. وعلى المحور الرأسي لعكس الأداء. المُحدّد بأنه معدل السلامة بالنسبة للسائقين البشريين.

نُحوّل أولاً المحور الأفقي. نختار نقطة على منحنى التعلّم الخاص بنا (tb, b) حيث تمثل tb عدد الأميال التي اختارها المستخدم والتي تظل بعدها نسبة مئوية ما b من تحسين الأداء (حدثت بالفعل نسبة مئوية $1-b$ من التحسين). وذلك أينما كان $0 < b < 1$.²⁰ ويجب توصيل النقطة (tb, b) على منحنى التعلّم للمركبة عالية المكننة بالنقطة $(t'b, b)$ على الدالة اللوجستية القياسية. وذلك يتطلب التدرج فقط لأن الحد الأدنى للنطاق متماثل في الدالتين ($t_0 = t'_0 = 0$).

ويتحقق هذا التدرج بالقسمة على $t'b/tb$. كما هو موضح في المعادلة B.1:

$$(B.1) \quad N(t) = e^{-t \frac{t'b}{tb}}$$

وكذلك يمكننا إيجاد قيمة $t'b$ عن طريق أخذ معكوس الدالة اللوجستية:

$$(B.2) \quad x = -\ln(f(x)),$$

مما يعني

$$(B.3) \quad N(t) = e^{-t \frac{-\ln(b)}{tb}}.$$

ثم بعد ذلك نُحوّل المحور الرأسي مع اثنين من العوامل المتغيرة:

• RI . وهو يمثل معدل السلامة النسبي الأولي للمركبات عالية المكننة

• RF . وهو يمثل أفضل معدل سلامة متوقع للمركبات عالية المكننة.

²⁰ لا يمكننا اختيار $b = 1$: لأن الدالة اللوجستية القياسية لها محور تقارب أفقي عند 1. كما أنه من غير المنطقي اختيار $b = 0$: لأنه لا يوجد تحويل مطلوب عند تلك النقطة.

وللقياس، نضرب بسط الدالة اللوجستية في $RI - RF$ ونعوض عنه باستخدام R_F . تحدد المعادلة B.4 الدالة الناتجة لمعدل السلامة للمركبات عالية المكننة مقارنة بمعدل السلامة الأولي للسائق البشري بعد عدد t من الأميال المقطوعة بالمركبات عالية المكننة:

$$(B.4) \quad R(t) = R_F + (R_I - R_F)e^{-t\left(\frac{-\ln(b)}{tb}\right)} .$$

- ABI Research, “ABI2p0 Research Anticipates Accelerated Diffusion of Automotive Software Over-the-Air Updates with Nearly 180 Million New SOTA-Enabled Cars Shipping Between 2016 and 2022,” press release, March 15, 2016. As of September 8, 2017:
<https://www.abiresearch.com/press/abi-research-anticipates-accelerated-adoption-auto/>
- Anderson, James M., Nidhi Kalra, Karlyn D. Stanley, Paul Sorensen, Constantine Samaras, and Oluwatobi A. Oluwatola, *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, RR-443-2-RC, 2016. As of January 24, 2016:
http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-2.html
- Bansal, Prateek, and Kara M. Kockelman, “Forecasting Americans’ Long-Term Diffusion of Connected and Autonomous Vehicle Technologies,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 95, January 2017, pp. 49–63.
- Bierstedt, Jane, Aaron Gooze, Chris Gray, Josh Peterman, Leon Raykin, and Jerry Walters, *Effects of Next-Generation Vehicles on Travel Demand and Highway Capacity*, Denver, Colo.: Fehr and Peers, January 2014. As of January 17, 2017:
http://orfe.princeton.edu/~alaink/Papers/FP_NextGenVehicleWhitePaper012414.pdf
- Blincoe, Lawrence, Ted R. Miller, Eduard Zaloshnja, and Bruce A. Lawrence, *The Economic and Societal Impact of Motor Vehicle Crashes 2010 (Revised)*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 812 013, May 2015. As of March 3, 2016:
<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pubs/812013.pdf>
- Bureau of Transportation Statistics, “Table 2-17: Motor Vehicle Safety Data,” in *National Transportation Statistics*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, April 2016. As of January 31, 2017:
https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_02_17.html
- Casualty Actuarial Society, *Restating the National Highway Transportation Safety Administration’s National Motor Vehicle Crash Causation Survey for Automated Vehicles*, Casualty Actuarial Society E-Forum, Vol. 1, Fall 2014. As of September 8, 2017:

https://www.casact.org/pubs/forum/14forum/CAS%20AVTF_Restated_NMVCCS.pdf

Collins, Susan M., “Chairman Susan M. Collins Opening Statement,” hearing on “The Automated and Self-Driving Vehicle Revolution: What Is the Role of Government?” U.S. Senate, Committee on Appropriations, Subcommittee on Transportation, Housing and Urban Development, and Related Agencies, November 16, 2016. As of September 8, 2017:

[https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/](https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/111616-Chairman-Collins-Opening-Statement-21.pdf)

[111616-Chairman-Collins-Opening-Statement-21.pdf](https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/111616-Chairman-Collins-Opening-Statement-21.pdf)

Consumer Reports, “Takata Airbag Recall—Everything You Need to Know,” 2017. As of January 23, 2017:

<http://www.consumerreports.org/cro/news/2016/05/>

[everything-you-need-to-know-about-the-takata-air-bag-recall/index.htm](http://www.consumerreports.org/cro/news/2016/05/everything-you-need-to-know-about-the-takata-air-bag-recall/index.htm)

Davies, Alex, “Ford’s Skipping the Trickiest Thing About Self-Driving Cars,” *Wired*, November 10, 2015. As of January 17, 2017:

<https://www.wired.com/2015/11/ford-self-driving-car-plan-google/>

Eccles, K., F. Gross, M. Liu, and F. Council, *Crash Data Analyses for Vehicle-to-Infrastructure Communications for Safety Applications*, Washington, D.C.: Federal Highway Administration, DTFH61-06-C-00013, 2012.

Fagnant, Daniel J., and Kara Kockelman, “Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 77, July 2015, pp. 167–181.

Federal Highway Administration, *FHWA Forecasts of Vehicle Miles Traveled (VMT): Spring 2016*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, May 2, 2016.

Funke, James, Gowrishankar Srinivasan, Raja Ranganathan, and August Burgett, *Safety Impact Methodology (SIM): Application and Results of the Advanced Crash Avoidance Technologies (ACAT) Program*, Paper No. 11-0367, 2011.

Google Auto LLC, *Google Self-Driving Car Testing Report on Disengagements of Autonomous Mode*, Menlo Park, Calif., December 2015. As of September 8, 2017:

https://www.dmv.ca.gov/portal/wcm/connect/dff67186-70dd-4042-bc8c-d7b2a9904665/google_disengagement_report.pdf?MOD=AJPERES

Gordon, T., H. Sardar, D. Blower, M. Ljung Aust, Z. Bareket, M. Barnes, A. Blankespoor, I. Isaksson-Hellman, J. Ivarsson, B. Juhas, K. Nobukawa, and H. Theander, *Advanced Crash Avoidance Technologies (ACAT) Program: Final Report of the Volvo-Ford-UMTRI Project: Safety Impact Methodology for Lane Departure Warning—Method Development and Estimation of Benefits*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 811 405, October 2010.

- Greenblatt, Jeffrey B., and Samveg Saxena, "Autonomous Taxis Could Greatly Reduce Greenhouse-Gas Emissions of U.S. Light-Duty Vehicles," *Nature Climate Change*, Vol. 5, 2015, pp. 860–863.
- Harper, Corey D., Chris T. Hendrickson, and Constantine Samaras, "Cost and Benefit Estimates of Partially-Automated Vehicle Collision Avoidance Technologies," *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 95, Part A, October 2016, pp. 104–115.
- Hayes, Brian, "Leave the Driving to It," *American Science*, Vol. 99, No. 5, October 2011, pp. 362–366.
- Houston, David J., and Lilliard E. Richardson, Jr., "The Politics of Air Bag Safety: A Competition Among Problem Definitions," *Policy Studies Journal*, Vol. 28, No. 3, August 2000, pp. 485–501.
- Jermakian, Jessica S., "Crash Avoidance Potential of Four Passenger Vehicle Technologies," *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 43, No. 3, May 2011, pp. 732–740.
- Jeyaraj, A., and R. Sabherwal, "Diffusion of Information Technology Innovations," *Wiley Encyclopedia of Management*, Vol. 7, 2015, pp. 1–7.
- Kalra, Nidhi, *Challenges and Approaches to Realizing Autonomous Vehicle Safety*, testimony submitted to the House Energy and Commerce Committee, Subcommittee on Digital Commerce and Consumer Protection, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, CT-463, February 14, 2017. As of September 8, 2017:
<https://www.rand.org/pubs/testimonies/CT463.html>
- Kalra, Nidhi, and David G. Groves, *The Enemy of Good: Estimating the Cost of Waiting for Nearly Perfect Automated Vehicles*, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, RR-2150-RC, 2017. As of November 3, 2017:
https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2150.html
- Kalra, Nidhi, and Susan M. Paddock, *Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?* Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, RR-1478-RC, 2016. As of September 8, 2017:
http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1478.html
- Karshenas, Massoud, and Paul L. Stoneman, "Rank, Stock, Order, and Epidemic Effects in the Diffusion of New Process Technologies: An Empirical Model," *RAND Journal of Economics*, Vol. 24, No. 4, 1993, pp. 503–528. As of September 8, 2017:
www.jstor.org/stable/2555742
- Li, Tianxin, and Kara M. Kockelman, *Valuing the Safety Benefits of Connected and Automated Vehicle Technologies*, Transportation Research Board 95th Annual Meeting, 2016.

- Litman, Todd, *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*, Victoria, British Columbia, Canada: Victoria Transport Policy Institute, January 2, 2017.
- Milakis, Dimitris, Bart van Arem, and Bert van Wee, “Policy and Society Related Implications of Automated Driving: A Review of Literature and Directions for Future Research,” *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, No. 4, 2017, pp. 324–348.
- Musk, Elon, “Tesla Press Conference for the Autopilot v7.0 Software,” October 14, 2015. As of December 15, 2016:
https://www.youtube.com/watch?v=73_Qjez1Mbl
- Nagy, Béla, J. Doyne Farmer, Quan M. Bui, and Jessika E. Trancik, “Statistical Basis for Predicting Technological Progress,” *PLoS ONE*, Vol. 8, No. 2, e52669, 2013.
- Najm, Wassim G., Samuel Toma, and John Brewer, *Depiction of Priority Light-Vehicle Pre-Crash Scenarios for Safety Applications Based on Vehicle-to-Vehicle Communications*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 811 732, 2013. As of September 8, 2017:
<https://ntl.bts.gov/lib/47000/47400/47497/DOT-VNTSC-NHTSA-11-12.pdf>
- National Highway Traffic Safety Administration, *National Motor Vehicle Crash Causation Survey*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 811 059, 2008.
- , *2015 Motor Vehicle Crashes: Overview*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 812 318, August 2016a. As of January 18, 2017:
<https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812318>
- , *Federal Automated Vehicles Policy: Accelerating the Next Revolution in Roadway Safety*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, September 2016b. As of January 17, 2017:
<https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/AV%20policy%20guidance%20PDF.pdf>
- , *2016 Fatal Motor Vehicle Crashes: Overview*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 812 456, October 2017. As of October 25, 2017:
<https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/Publication/812456>
- Newell, Allen, and Paul S. Rosenbloom, “Mechanisms of Skill Acquisition and the Law of Practice,” *Cognitive Skills and Their Acquisition*, Vol. 1, 1980, pp. 1–55.
- NHTSA—See National Highway Traffic Safety Administration.
- Nishimoto, Alex, “All New Tesla Models Will Feature Level 5-Capable Autopilot Hardware,” *Motortrend*, October 19, 2016. As of January 17, 2017:
<http://www.motortrend.com/news/new-tesla-models-will-feature-level-5-capable-autopilot-hardware>

Oremus, Will, “Is Autopilot a Bad Idea? Why Ford, Google, Volvo and Others Think Tesla Is Wrong About Automation,” *Slate*, July 6, 2016. As of January 2017:

http://www.slate.com/articles/technology/future_tense/2016/07/is_tesla_s_style_of_autopilot_a_bad_idea_volvo_google_and_others_think_so.html

Perez, M., L. S. Angell, J. Hankey, R. K. Deering, R. E. Llaneras, C. A. Green, M. L. Neurauter, and J. F. Antin, *Advanced Crash Avoidance Technologies (ACAT) Program—Final Report of the GM-VTTI Backing Crash Countermeasures Project*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 811 452, August 2011.

Rau, Paul, Mikio Yanagisawa, and Wassim G. Najm, *Target Crash Population of Automated Vehicles*, Paper No. 15-0430, 2015.

SAE International, *Surface Vehicle Recommended Practice: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, Warrendale, Pa., J2016, September 2016.

Tesla, “Autopilot,” web page, undated. As of September 8, 2017:

<https://www.tesla.com/autopilot>

Trimble, T. E., R. Bishop, J. F. Morgan, and M. Blanco, *Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts: Past Research, State of Automation Technology, and Emerging System Concepts*, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, DOT HS 812 043, July 2014. As of September 8, 2017:

http://ntl.bts.gov/lib/45000/45400/45476/812043_HF-EvaluationLevel2andLevel3AutomatedDrivingConceptsV2_1_.pdf

U.S. Department of Transportation, “U.S. DOT and IIHS Announce Historic Commitment of 20 Automakers to Make Automatic Emergency Braking Standard on New Vehicles,” press release, March 17, 2016. As of January 17, 2017:

<https://www.nhtsa.gov/press-releases/>

[us-dot-and-iihs-announce-historic-commitment-20-automakers-make-automatic-emergency](https://www.nhtsa.gov/press-releases/us-dot-and-iihs-announce-historic-commitment-20-automakers-make-automatic-emergency-braking-standard-on-new-vehicles)

Walden, Greg, “Opening Statement of Chairman Greg Walden,” hearing on “Self-Driving Cars: Road to Deployment,” U.S. House of Representatives, Energy and Commerce Committee, Subcommittee on Digital Commerce and Consumer Protection, February 14, 2017. As of September 8, 2017:

<http://docs.house.gov/meetings/IF/IF17/20170214/>

[105548/HHRG-115-IF17-MState-W000791-20170214.pdf](http://docs.house.gov/meetings/IF/IF17/20170214/105548/HHRG-115-IF17-MState-W000791-20170214.pdf)

Waymo, *Report on Autonomous Mode Disengagements for Waymo Self-Driving Vehicles in California*, Mountain View, Calif., December 2016.

<https://www.dmv.ca.gov/portal/wcm/connect/946b3502-c959-4e3b-b119-91319c27788f/>

GoogleAutoWaymo_disengage_report_2016.pdf?MOD=AJPERES

Winkle, Thomas, “Safety Benefits of Automated Vehicles: Extended Findings from Accident Research for Development, Validation and Testing in Autonomous Driving,” in Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz, and Hermann Winner, eds., *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*, London: SpringerOpen, 2015, pp 335–364.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-48847-8_17/fulltext.html

Zhang, Benjamin, “Tesla Wants to Take Self-Driving Cars to a Whole New Level,” *Business Insider*, January 11, 2016. As of December 15, 2016:
<http://www.businessinsider.com/elon-musk-on-tesla-over-the-air-software-update-summon-feature-2016-1>



www.rand.org