



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۳ | خرداد ۱۴۰۱ (ص ۶۷۶-۶۶۳)

[DOI:https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.337500.669186](https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.337500.669186)

(مقاله مروری)

## Review and Evaluation of Theories and Empirical Models of Vehicle Stability in Floods

REYHANEH GOLMOHAMMADI<sup>1</sup>, ALIREZA SHOKOOHI<sup>1\*</sup>

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: Jan. 16, 2022- Revised: March. 7, 2022- Accepted: March. 14, 2022)

### ABSTRACT

The Knowledge of assessing the stability of vehicles in floodwater is crucial for conscious flood risk management in urban areas. Cars instability in floodwater is classified in three forms: slipping, floating, and overturning, which causes a lot of financial and human losses. Therefore, it is important to assess the stability of vehicles in floodwater to make decisions to reduce the damage and risks associated with it. Few studies have been conducted to determine the instability threshold of vehicles in floods, most of which focus on parked vehicles. This field of study in Iran is a primitive level and no specific work has been done in this regard so far. In this article, experimental, theoretical, and theoretical- experimental studies conducted in instability threshold of stationary vehicles field are reviewed in two periods of 1960-2000 and 2010-2020. In addition, the criteria set out in the Australian Rainfall and Runoff Guideline is used as the main source for determining the instability threshold. The most important achievement of this research is reviewing most of the researches done to predict the behavior of vehicles in flood events. In addition, the strengths and weaknesses of the researches and presented methods were interpreted and evaluated. Finally, the method which can be used in Iran introduced and offers for starting applied research in this field in the country suggested.

**Keywords:** Vehicle Stability in Flood, Sliding, Floating and Toppling of Vehicle, AR&R model.

## مروزی و ارزیابی نظریه‌ها و مدل‌های تجربی پایداری وسایل نقلیه در سیلاب

ریحانه گل‌محمدی<sup>۱</sup>، علیرضا شکوهی<sup>۱\*</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳)

### چکیده

دانش ارزیابی پایداری وسایل نقلیه در سیلاب برای مدیریت آگاهانه خطر سیل در مناطق شهری بسیار مهم است. ناپایداری خودروها در سیلاب به سه شکل لیز خوردن، شناوری و واژگونی می‌باشد که خسارات مالی و جانی زیادی را به همراه دارد؛ بنابراین ارزیابی پایداری وسایل نقلیه در سیلاب به منظور اتخاذ تصمیماتی برای کاهش خسارات و خطرات ناشی از آن حائز اهمیت است. مطالعات معدودی در زمینه تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب انجام شده است که تمرکز اغلب آن‌ها بر روی خودروهای پارک شده می‌باشد. مبحث مزبور در کشور ایران در حدی ابتدایی بوده و عملاً تاکنون کاری جدی در این ارتباط صورت نگرفته است. در مقاله حاضر، مطالعات تجربی، نظری و تجربی- نظری انجام شده در زمینه آستانه ناپایداری خودروهای ساکن در سیلاب در دو بخش مطالعات اولیه در سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۰۰ و مطالعات اخیر در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰ مرور و مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعلاوه معیارهای ارائه شده در راهنمای بارش و رواناب استرالیا به عنوان منبعی کاربردی و درعین حال قابل اعتماد برای تعیین آستانه ناپایداری شرح داده می‌شود. مهم‌ترین دستاورد این تحقیق، مرور اکثر پژوهش‌های انجام شده برای پیش‌بینی رفتار خودروها در سیلاب، تفسیر و ارزیابی نقاط قوت و ضعف تحقیقات و روش‌های ارائه شده و درنهایت معرفی روش قابل استفاده در ایران و ارائه پیشنهادهایی برای شروع تحقیقات کاربردی در این زمینه در کشور می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آستانه ناپایداری خودرو در سیلاب، لغزش، شناوری و واژگونی خودرو، مدل AR&R.

### مقدمه

با افزایش دمای کره زمین، تغییرات اقلیمی در سطح جهان و همین‌طور ایران در حال رخ دادن است. این تغییرات منجر به وقوع بارش‌هایی با شدت زیاد و کوتاه‌مدت می‌شود که احتمال وقوع سیل‌های ناگهانی در سطح شهرها را افزایش می‌دهد. وسایل نقلیه نیز یکی از نیازهای بشر برای انجام کارهای روزمره در سطح شهرها است که تعداد آن نیز در حال افزایش می‌باشد. وقتی که سیل ناگهانی به وقوع بپیوندد، به سرعت در سطح شهر گسترش می‌یابد و ممکن است هر آنچه در مسیرش باشد از جمله خودروها را شسته و با خود حمل کند و خسارات زیادی را بر جای بگذارد (Golmohammadi & Shokoohi, 2021). بررسی مخاطرات وسایل نقلیه در سیلاب بر اساس آستانه ناپایداری آن‌ها صورت می‌گیرد.

وسایل نقلیه در سیلاب ممکن است تحت شرایط دینامیکی نامطلوبی تعادلشان را از دست بدهند و ناپایدار شوند (Shah et al., 2017) و این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که مقدار عمق یا سرعت سیل از یک حدی بیشتر شود. ناپایداری خودروها در سیلاب بر روی سطحی بدون شیب به سه شکل لیز خوردن بر روی سطح

زمین، شناور شدن در سیلاب و واژگونی می‌باشد (Shand et al., 2011). ماشین ممکن است در سلیلی با عمق زیاد و سرعت کم شناور شود یا در زمانی که سرعت سیل زیاد و عمق آن کم است و در صورت از بین رفتن اصطکاک بین چرخ‌ها و سطح زمین لیز بخورد (Smith, 2015). البته ممکن است ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب در ترکیبی از انواع مختلف آن رخ دهد. سطح ناپایداری خودروها در سیلاب متأثر از خصوصیات آن‌ها مانند وزن، نحوه طراحی و فاصله شاسی از سطح زمین و غیره می‌باشد (Martinez-Gomariz et al., 2018).

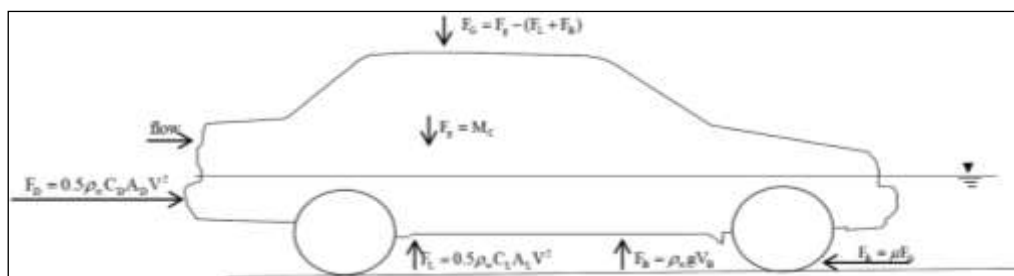
برای تعیین وضعیت پایداری و ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب مطالعات تجربی، نظری و تجربی- نظری معدودی در طول سالیان دراز و در محدوده سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۰۰ (مطالعات اولیه) و ۲۰۱۰-۲۰۲۰ (مطالعات اخیر) با هدف تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب انجام شده است. در روابط ارائه شده در مطالعات اولیه برای تعیین آستانه ناپایداری خودروها دو متغیر مهم عمق و سرعت سیل مدنظر محققین بوده، در صورتی که در مطالعات اخیر خصوصیات وسایل نقلیه مدرن نیز مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در مطالعات اخیر شرایط مختلف قرارگیری

عبور آن از سطح جسم (مانند سیلاب) به آن نیروی هیدرودینامیکی گفته می‌شود. نیروهای مورد استفاده در تحلیل پایداری جسم شامل شناوری، اصطکاک، درگ (نیروی کشنده)، لیفت (نیروی بالابرنده) و وزن جسم است که در جهات مختلف به وسایل نقلیه مستغرق در سیل وارد می‌شوند. نیروی اصطکاک همان نیروی مماسی ایجاد شده بین لاستیک خودرو و سطح زمین است. این نیرو نقش نیروی بازدارنده را داشته و شامل اصطکاک استاتیکی و جنبشی می‌شود. نیروی اصطکاک که بین لاستیک خودرو ساکن و سطح زمین وجود دارد، استاتیکی است و خودرو را در محل خود به حالت سکون نگه می‌دارد و از جابه‌جایی آن جلوگیری می‌کند. این نیرو با زبری سطح و ضریب اصطکاک استاتیکی متناسب است. زمانی که وسیله نقلیه شروع به لیز خوردن کند، اصطکاک استاتیکی صفر می‌شود. با این حال هنوز هم نیروی مقاوم وجود دارد که به آن اصطکاک جنبشی یا لغزشی می‌گویند که با ضریب اصطکاک جنبشی متناسب است. نیروی درگ سعی در به حرکت درآوردن ماشین دارد و در خلاف جهت نیروی اصطکاک و توسط سیال به جسم وارد می‌شود. طبق تعریف، مؤلفه این نیرو در امتداد سرعت سیال را درگ و مؤلفه عمود آن را بالابرنده می‌نامند. اگر نیروی درگ بیشتر از اصطکاک استاتیکی باشد، وسیله نقلیه روی سطح زمین لیز می‌خورد و پایداری‌اش را از دست می‌دهد. نیروی شناوری به سمت بالا است که توسط سیال وارد می‌شود و جهت آن مخالف نیروی وزن جسم غوطه‌ور است. از این رو اگر مجموع نیروهای شناوری و بالابرنده بزرگ‌تر از نیروی وزن وسیله نقلیه باشد، آن وسیله نقلیه شناور شده و توسط جریان آب به حرکت درمی‌آید. اگر زمانی که خودرو شناور است و یا بر روی سطح زمین لیز می‌خورد به سطح ناهمواری برسد، واژگون می‌شود. در نتیجه با فرض قرار گرفتن وسایل نقلیه در سطحی بدون شیب می‌توان ناپایداری خودروها را به سه شکل معمول لیز خوردن بر روی سطح زمین، شناوری و واژگونی در نظر گرفت (Shah et al., 2019; Arrighi et al., 2016; Shand et al., 2011).

خودرو در جریان آب اعم از استغراق جزئی یا کامل، شیب و زوایای مختلف نیز مدنظر بوده است. اگر خودرو به طور کامل در جریان آب قرار گیرد، در شرایط استغراق کامل است و در غیر این صورت در وضعیت استغراق جزئی قرار دارد. در اکثر مطالعات صورت گرفته، از نیروهای هیدرودینامیکی برای ارائه فرمول‌هایی به منظور برآورد آستانه ناپایداری وسایل نقلیه پارک شده در سیلاب استفاده شده است. در کنار روش‌های تجربی، یکی از اصلی‌ترین منابع نظری موجود برای تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب، راهنمای بارش و رواناب استرالیا (AR&R<sup>1</sup>) (۲۰۱۱) است که به کمک آن می‌توان آستانه ناپایداری خودروهای کوچک، بزرگ و بزرگ 4WD را تعیین کرد. در این راهنما برای هر دسته از خودروها یک منحنی و شاخص هیدرودینامیکی ارائه شده است.

در مقاله حاضر ابتدا راجع به نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر وسایل نقلیه در سیلاب توضیحاتی داده می‌شود. سپس مطالعات تجربی و نظری که تاکنون توسط محققین انجام شده است در دو بخش مطالعات اولیه و اخیر مرور می‌گردد و پس از آن معیارهای موجود در راهنمای بارش و رواناب استرالیا معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرند. تمرکز اکثر مطالعاتی که در مقاله حاضر به آن‌ها پرداخته شده بر روی خودروهای پارک شده است زیرا بررسی ناپایداری خودروهای در حال حرکت در هنگام وقوع سیل امری بسیار پیچیده می‌باشد و مقالات اندکی در این زمینه منتشر شده است. در آخر نقاط قوت و ضعف مطالعات انجام شده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و مناسب‌ترین راهنما و روش معرفی می‌گردد.

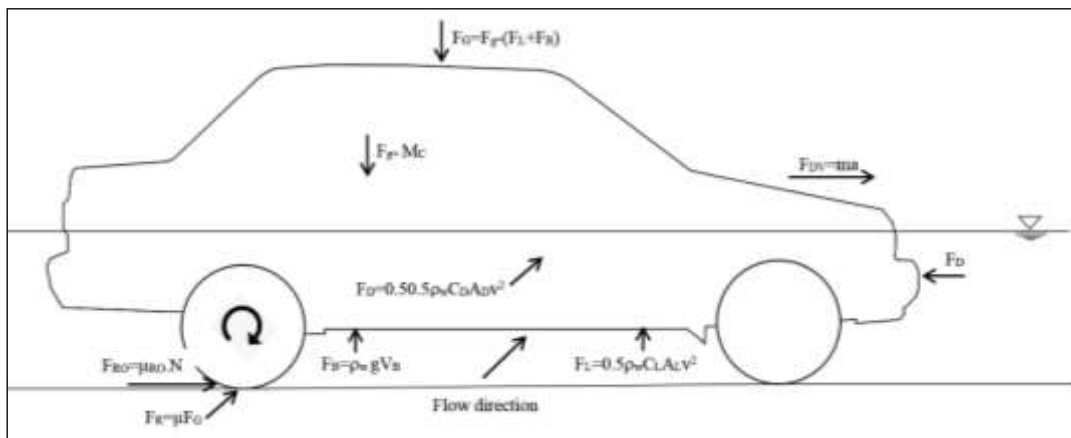
نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر وسایل نقلیه ساکن در سیلاب همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، هرگاه یک جسم صلب یا قسمتی از آن (مثلاً یک سطح) در مجاورت یک سیال (مایع یا گاز) قرار داشته باشد، در آن صورت به علت فشاری که از طرف سیال به سطح یا جسم وارد می‌شود، این جسم تحت تأثیر نیروی فشاری قرار می‌گیرد که در صورت جاری بودن سیال و



شکل ۱- نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر وسایل نقلیه ساکن در هنگام وقوع سیلاب

خودرو بر روی یک سطح بدون شیب در زمان وقوع سیل در حرکت است، نیروی درگ ناشی از جریان ورودی برابر با نیروی اصطکاک و نیروی محرکه ناشی از موتور خودرو است. اگر  $F_D > F_R + F_{RO} + F_{DV}$  گردد خودرو در حال حرکت بر روی زمین لیز می‌خورد. وقتی این اتفاق رخ دهد نیروی درگ در دو جهت یعنی در قسمت جلو خودرو که خلاف جهت جریان است و در وجه عقب خودرو که در جهت جریان است، اثر می‌کند (Shah et al., 2018).

**نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر وسایل نقلیه در حرکت در سیلاب**  
 معیارهای ناپایداری ارائه شده برای خودروهای در حال حرکت در هنگام وقوع سیل متفاوت است. دلیل این تفاوت، دو عامل اصلی مقاومت غلتشی (Rolling resistance) و نیروی محرکه (driving force) می‌باشد. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر وسایل نقلیه در حرکت در شکل (۲) نشان داده شده است.  $F_{RO}$  نیروی مقاومت غلتشی موردنیاز برای جلوگیری از چرخش لاستیک و  $F_{DV}$  نیروی محرکه ناشی از موتور خودرو می‌باشد. در چنین شرایطی وقتی



شکل ۲- نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر وسایل نقلیه در هنگام وقوع سیلاب

کردند.

$$\mu = \frac{F_H}{F_V} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در معادله فوق نیروی عکس‌العمل افقی  $F_H$  از نیروی مومنتوم و فشار وارد شده به وجوه راست و چپ خودرو به دست می‌آید و نیروی عمودی  $F_V$  متشکل از نیروی شناوری، وزن وسیله نقلیه و مؤلفه‌های عمودی نیروی مومنتوم وارده شده به وجوه پایین و بالا ماشین است (Bonham and Hattersley, 1967). پس از آن Gordon and Stone (1973) نیز همین آزمایش‌ها را تکرار کردند و Morris Mini Sedan با مقیاس ۱:۱۶ را موازی با جهت جریان قرار دادند. آن‌ها مقادیر ضرایب اصطکاک استاتیک و جنبشی را با استفاده از رابطه (۲) محاسبه و به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ پیشنهاد کردند.

$$\frac{F_H}{\mu F_V} = 1 \quad (\text{رابطه ۲})$$

شایان ذکر است که علی‌رغم تأیید نتایج Bonham and

### مطالعات اولیه تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه ساکن در سیلاب در سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۰۰

اولین گزارش مدون که در آن به مبحث پایداری وسیله نقلیه در سیلاب بر اساس اندازه‌گیری میدانی پرداخته شده توسط UNSW<sup>۱</sup> ارائه شده است که در آن ضریب اصطکاک در شرایط پایداری وسایل نقلیه در سیل در کانبرا بین ۰/۸۵ تا ۱/۱۵ اندازه‌گیری شد و برای شرایط ناپایداری بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۸ به دست آمده بود (Woods et al., 1960). پس از این مطالعه میدانی در مبحث ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب، اولین پژوهشی که مربوط به مطالعات آزمایشگاهی است توسط Bonham and Hattersley (1967) انجام شد. این دو محقق مدل فیزیکی Ford Falcon با مقیاس ۱:۲۵ را در فلوم و عمود بر جهت جریان قرار دادند و آن را با نخ‌هایی به صورت عمودی و افقی مهار کردند. سپس جریان آب را با یک دبی ثابت و سرعت و عمق‌های مختلف در فلوم عبور دادند و به نیروهای عکس‌العمل عمودی و افقی دست یافتند. آن‌ها با استفاده از رابطه (۱) ضریب اصطکاک را محاسبه و در نهایت مقدار آن را برای اکثر سطوح ۰/۳ پیشنهاد

نظر گرفته می‌شود. همچنین  $\rho$  چگالی آب ( $\text{kg/m}^3$ ) و  $A_D$  مساحتی از جسم غوطه‌ور برحسب  $\text{m}^2$  است که عمود بر جهت جریان می‌باشد. بعلاوه  $C_D$  ضریب درگ است که آن‌ها پیشنهاد کردند اگر نیروی درگ روی چرخ‌ها وارد شود  $1/1$  و اگر روی بدنه خودرو وارد شود  $1/15$  در نظر گرفته شود. نتایج این پژوهش نشان داد برای شناور شدن وسایل نقلیه در سیلاب، اعماق  $0/34$  تا  $0/4$  متر موردنیاز است (Keller and Mitsch, 1993). با این حال این نتایج با داده‌های تجربی و واقعی مورد مقایسه قرار نگرفته‌اند و تأیید نشده‌اند. خلاصه‌ای از مطالعات اولیه در جدول (۱) آورده شده است.

Hattersley (1967) مبنی بر مقدار ثابت  $\mu=0/3$  توسط Gordon and Stone (1973) and این مقدار توسط Shand et al. (2011) محافظه‌کارانه قلمداد می‌گردد. (Keller and Mitsch (1993) با انجام پژوهشی نظری و مساوی قراردادن نیروهای درگ و اصطکاک رابطه (۳) را به‌منظور تعیین آستانه لیز خوردن وسایل نقلیه در سیلاب ارائه کردند. با استفاده از این رابطه می‌توان سرعتی از سیل را که موجب حرکت اولیه خودرویی مشخص می‌گردد را به دست آورد.

$$v = \sqrt{\frac{2\mu F_G}{\rho C_D A_D}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن  $v$  سرعت اولیه (m/s) و  $\mu$  ضریب اصطکاک است که بر اساس پژوهش (Bonham and Hattersley (1967)،  $0/3$  در

جدول ۱- خلاصه مطالعات اولیه تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب از سال ۱۹۶۰-۲۰۰۰ (Shand et al., 2011)

Keller and Mitsch (1993)	Gordon and Stone (1973)	Bonham and Hattersley (1967)	پژوهش شیوه مطالعه
نظری	تجربی	تجربی	وسایل نقلیه مدل
Toyota Corolla, Suzuki Swift, Ford Laser, Honda Civic, Ford LTD	Morris Mini Sedan	Ford Falcon	دوره زمانی وسیله نقلیه فاصله شاسی وسیله نقلیه مدل از سطح زمین (m)
اواخر دهه ۱۹۹۰، ۰/۱۰، ۰/۱۵۵، ۰/۱۷، ۰/۱۵	اوایل دهه ۱۹۷۰	نتایج برای مدل‌های دیگر مقیاس‌بندی شده است. اوایل تا اواخر دهه ۱۹۶۰	مقیاس
۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۸	زاویه قرارگیری استغراق نوع سطوح شیب زمین محدوده عمق‌های استفاده‌شده (m)
-	۱:۱۶	۱:۲۵	محدوده سرعت‌های استفاده‌شده (m/s)
عمود بر جریان جزئی	موازی با جریان جزئی	عمود بر جریان جزئی	عمق شناوری (m)
-	-	-	نتیجه معادله پایداری ضریب اصطکاک مفروض
-	مسطح	مسطح	
۰/۰۲۵ - ۰/۳۷۵	۰/۱۲ - ۰/۵۷	۰/۱۱ - ۰/۵۷	
۰/۶ تا > ۳/۵	۰/۵۰ - ۳/۶۹	۰/۴۸ - ۳/۰۹	
۰/۴ - ۰/۳۴ برای انواع مختلف	(جلو) ۰/۵ و (عقب) ۰/۴۲	۰/۵۷	
$v = \left(\frac{2\mu F_v}{\rho C_D A_D}\right)^{0.5}$	$\frac{F_H}{\mu F_v} = 1$	$\mu = \frac{F_H}{F_v}$	
۰/۳	مختلف، بین ۱ - ۰/۳	مختلف، ۰/۳ توصیه شد.	

شود ادامه دارد و پس از آن سرعت در آستانه با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. او همچنین مجدداً همان رابطه (۳) را برای تعیین آستانه ناپایداری خودروها ارائه کرد.

Xia et al., (2011) با انجام مطالعه‌ای نظری، رابطه (۴) را برای تخمین سرعت اولیه در آستانه ناپایداری از نوع لیز خوردن در شرایط استغراق کامل ارائه کردند. آن‌ها از داده‌های آزمایشگاهی (Teo (2010) با مقیاس ۱:۴۳ برای محاسبه  $\alpha$  و  $\beta$  و با مقیاس ۱:۱۸ برای ارزیابی صحت و درستی این فرمول استفاده کردند.

### مطالعات اخیر تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه ساکن در سیلاب در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰

پس از مطالعه Keller and Mitsch (1993) تا سال ۲۰۱۰ پژوهش قابل توجهی انجام نشده است. (Teo (2010) مدل‌های فیزیکی Mini Cooper، BMW M5 و Mitsubishi Pajero با مقیاس‌های ۱:۲۴ و ۱:۱۸ را در دو فلوم با عرض‌های  $0/3$  و  $1/2$  متر عمود بر جهت جریان قرار داد. وی نتیجه گرفت زمانی که خودرو به‌صورت جزئی مستغرق باشد، سرعت در آستانه ناپایداری با افزایش عمق کاهش می‌یابد و این تا زمانی که خودرو به‌صورت کامل مستغرق



اندازه‌گیری کردند. آن‌ها در نهایت رابطه (۷) را برای محاسبه آستانه ناپایداری خودروهایی با استغراق جزئی و عمود بر جریان ارائه کردند.

$$U_c = \alpha \left( \frac{hf}{hc} \right)^\beta \sqrt{2g b_c \left( \frac{h_c \rho_c}{h_f \rho_f} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_f} \right)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

یکی از مفصل‌ترین کارهای آزمایشگاهی توسط Martinez-Gomariz et al., (2017) انجام شد. آن‌ها با فلومی شیب‌پذیر مدل‌های فیزیکی (BMW 650 (1:14), mini cooper (1:18, 1:24, Mercedes class C, Mercedes GLA (1:14), and 1:14), Porsche Cayenne, Range Rover Evoque (1:14), (1:18), Bentley Continental GT Speed (1:18), Turbo (1:14), Audi Q7, BMW X6 (1:14), Volkswagen Touareg (1:14), (1:14) و Mercedes G55 AMG (1:14) را در زوایای مختلف داخل فلوم آزمایشگاهی با شیب صفر تا ۴ درصد قرار دادند. هدف از انجام این پژوهش دستیابی به آستانه ناپایداری وسایل نقلیه بدون در نظر گرفتن سرعت جریان بود. برای این منظور آن‌ها روابط (۸) و (۹) را به ترتیب برای محاسبه عمق شناوری و ضریب پایداری ارائه کردند. آن‌ها نمودار ضریب پایداری و تابع عمق  $\times$  سرعت (vxy) را برای نشان دادن مجموعه نقاط ناپایداری تمامی مدل‌های فیزیکی نامبرده ترسیم کردند که نشان می‌داد همبستگی قابل قبولی بین هر دو متغیر با ضریب تعیین ( $R^2$ ) ۰/۹۳ وجود دارد.

$$h_b = \frac{M_c}{\rho_w \cdot l_c \cdot b_c} + GC \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$S_c = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \cdot \mu \quad (\text{رابطه ۹})$$

در رابطه (۸) GC<sup>۱</sup> ارتفاع شاسی وسیله نقلیه از سطح زمین (m) و Mc وزن خالص خودرو است. در رابطه (۹) PA مساحت سطح فلوم شیشه‌ای برابر با ۳۸/۹ × ۹/۱۸ سانتی‌متر مربع می‌باشد. خلاصه‌ای از مطالعات اخیر بر اساس نحوه انجام آن‌ها به صورت تجربی، نظری و تجربی-نظری در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰ به ترتیب در جداول (۲) و (۳) آورده شده است.

Smith et al., (2019) آستانه ناپایداری خودروهای Toyota Yaris, Ford Festiva و Nissan Patrol با مقیاس کامل را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. این در حالی است که در تحقیقات قبلی تمرکز بر روی مدل‌های مقیاس‌بندی شده بود. آن‌ها رابطه‌ای بین نیروی اصطکاک نسبی و عمق آب بالای کف خودرو ارائه کردند و مقادیر ضریب درگ را هم برای شرایط زیربحرانی، بحرانی و فوق بحرانی بین ۰/۹۸ تا ۱/۳۸ با میانگین

$$U_c = \alpha \times \left( \frac{h}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2g \left( \frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f} \right) h_c} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در معادله (۴)  $U_c$  سرعت در آستانه ناپایداری (m/s)،  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب مرتبط با وسایل نقلیه،  $h$  عمق آب (m)،  $h_c$  ارتفاع خودرو (m) است (Xia et al., 2011). در همان سال (Shu et al., 2011) با انجام مطالعه‌ای نظری و تجربی رابطه (۵) را برای محاسبه آستانه ناپایداری خودروهایی با استغراق جزئی و موازی با جریان ارائه دادند. آن‌ها Ford Focus, Ford Transit و Volvo XC90 را مقیاس ۱:۱۸ را در فلوم آزمایشگاهی قرار دادند و ضریب اصطکاک را به کمک ترازوی فنری برای هر کدام به ترتیب ۰/۵، ۰/۳۹ و ۰/۶۸ اندازه‌گیری کردند.

$$U_c = \alpha \left( \frac{hf}{hc} \right)^\beta \sqrt{2g l_c \left( \frac{h_c \rho_c}{h_f \rho_f} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_f} \right)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه فوق  $h_f$  ارتفاع سیلاب (m) و  $h_b$  عمق شناوری (m) است. سرعت محاسبه‌شده با استفاده از رابطه (۵) با مقادیر اندازه‌گیری شده با ضریب همبستگی ۹۷٪ مطابقت داشت. معادله (۵) این اطمینان را می‌دهد که اگر عمق جریان ورودی کمتر از ارتفاع وسیله نقلیه باشد (در استغراق جزئی) سرعت آستانه با کاهش عمق افزایش می‌یابد (Shu et al., 2011).

Toda et al., (2013) دو مدل فیزیکی Sedan و Mini van با مقیاس ۱:۱۰ و ۱:۱۸ را عمود و موازی با جهت جریان قرار دادند. آن‌ها تأثیر نیروی لیفت را هم در نظر گرفتند و رابطه (۶) را برای محاسبه آستانه شناوری خودروها ارائه کردند. همچنین ضرایب اصطکاک اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها بر حسب زاویه برخورد جریان برای نوع سواری بین ۰/۲۶ (صفر درجه) و ۰/۵۷ (۹۰ درجه) و برای مینی ون ۰/۴۲ (صفر درجه) و ۰/۶۵ (۹۰ درجه) متغیر است.

$$\frac{F_D}{\mu(M_c g - F_B - F_L)} = 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

Toda et al., (2013) نتیجه گرفتند اگر عمق و سرعت جریان بیش از ۰/۵ m و ۲ m/s باشد، احتمالاً ماشین سواری با مقیاس واقعی شناور خواهد شد.

Xia et al., (2014) در مطالعه‌ای تجربی و نظری فرمول‌های ارائه‌شده توسط Shu et al., (2011) را بررسی کردند. آن‌ها برای به دست آوردن مقادیر عمق و سرعت جریان در آستانه ناپایداری، خودروهای Honda Accord و Audi Q7 با مقیاس ۱:۱۴ و ۱:۲۴ را در سه زاویه جهت‌گیری (صفر، ۱۸۰ و ۹۰ درجه) و در دو شیب (۱:۵۰ و ۱:۱۰۰) قرار دادند. همچنین ضریب اصطکاک را برای حالت عمود بر جریان ۰/۷۵ و در حالت موازی با جریان ۰/۲۵

سطح عمود بر سیلاب) دست یافتند. روش پیشنهادی با یک سری آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۲۴ در شرایط زیربحرانی با استغراق جزئی ارزیابی و نهایتاً تأیید شد. آن‌ها اظهار داشتند ضرایب درگ ( $C_D$ ) و لیفت ( $C_L$ ) برای وسایل نقلیه با استغراق کامل و جزئی تاکنون به صورت کمی تعیین نشده است؛ بنابراین نیاز است تا برآورد عددی قابل‌اعتماد از این ضرایب صورت گیرد.

۱/۸۳ اندازه‌گیری و ارائه نمودند. در مقابل این تحقیقات، Shah et al., (2019) اظهار داشتند با توجه به پیشرفت تدریجی طراحی وسایل نقلیه، انجام مطالعات تجربی دیگر امکان‌پذیر نیست. آن‌ها نیروهای هیدرودینامیکی را به صورت جداگانه محاسبه کردند و نوع و آستانه ناپایداری را نیز مشخص نمودند. همچنین با استفاده از نرم‌افزارهای Auto Cad (2007) ، Solid- Works (2015) و ANSYS (Static Structural, Workbench 15.0) به مقادیر دو متغیر  $V$  (حجمی از وسیله نقلیه مستغرق در آب) و  $A_D$  (مساحت

جدول ۲- خلاصه مطالعات تجربی اخیر در زمینه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب از سال ۲۰۱۰-۲۰۲۰ (Shand et al., 2011)

(Martinez- Gomariz et al. (2017)	Toda et al. (2013)	Teo (2010)	پژوهش شیوه مطالعه
تجربی BMW 650 (1:14), mini cooper (1:18, 1:24 and 1:14), Mercedes GLA (1:14), Mercedes class C (1:18), Range Rover Evoque(1:14), Porsche Cayenne Turbo (1:14), Bentley Continental GT speed (1:18), Volkswagen Touareg (1:14), BMW X6 (1:14), Audi Q7 (1:14) and Mercedes G55 AMG (1:14)	تجربی Tipo Sedan, Tipo Minivan	تجربی Mini Cooper, BMW M5, Mitsubishi Pajero	نوع وسیله نقلیه
کنونی ۰/۰۸۴، ۰/۱۲۶، ۰/۱۲، ۰/۱۵۴، ۰/۱۵۴، ۰/۱۶۸ ۰/۱۶۲، ۰/۱۶۸، ۰/۱۸۲، ۰/۱۸، ۰/۲۲۴، ۰/۲۲۴ ۰/۲۵۲، ۰/۲۸	کنونی -	کنونی ۰/۱۴۹، ۰/۱۷۷، ۰/۲۲۵	دوره زمانی وسیله نقلیه فاصله شاسی وسیله نقلیه مدل از سطح زمین (m)
۱:۲۴ و ۱:۱۸، ۱:۱۴	۱:۱۰ (سواری) و ۱:۱۸ (مینی ون)	۱:۴۳ و ۱:۱۸	مقیاس زاویه قرارگیری استغراق
تمامی زوایا جزئی بیک لایت مسطح	۴۵، ۰ و ۹۰ درجه جزئی مورتار مسطح	زوایای مختلف بین ۲۰ تا ۹۰ درجه جزئی و کامل زبر مسطح	نوع سطوح شیب زمین محدوده عمق‌های استفاده‌شده (m)
۰/۶۸ تا ۰/۴	۰/۳ تا ۰/۶۹ (سواری) ۰/۴۳ تا ۱/۲۱ (مینی ون) ۱/۰۵ تا ۲ (سواری) ۱/۲۴ تا ۲/۳۵ (مینی ون)	۰/۶۴۵ تا ۴/۸۱۶ ۲/۳۷ تا ۷/۹۴	محدوده سرعت‌های استفاده‌شده (m/s)
۰/۳۹۲، ۰/۳۸۷، ۰/۳۹۶، ۰/۳۹۹، ۰/۴۰۶، ۰/۴۳۴ ۰/۴۵۰، ۰/۴۶۲، ۰/۵۳۲، ۰/۵۳۱، ۰/۵۰۴، ۰/۵۹۵ ۰/۵۱۱، ۰/۶۸۶	اتومبیل‌های نوع سواری در شرایط $U > 2$ و $h < 0.5$ شناور می‌شوند. $U$ : سرعت جریان $h$ : عمق آب	موجود نیست	عمق شناوری (m)
$(v.y) = 0.0158.SC_{mod} + 0.32$ (v.y): آستانه پایداری برای هر وسیله نقلیه $SC_{MOD}$ : ضریب پایداری اصلاح‌شده $SC_{mod} = \frac{GC.M_c}{PA} . \mu$ GC: فاصله شاسی وسیله نقلیه از سطح زمین $M_c$ : وزن کل خودرو با سوخت و تجهیزات PA: مساحت طرح $\mu$ : ضریب اصطکاک	$\frac{F_D}{\mu(M_c g - F_B - F_L)} = 1$ $\mu$ : ضریب اصطکاک $F_D$ : نیروی درگ $M_c$ : وزن وسیله نقلیه $F_B$ : نیروی شناوری $F_L$ : نیروی لیفت	$U_c = \left[ \frac{2.\mu.N}{\rho.C_D.A} \right]^{0.5}$ $\mu$ : ضریب اصطکاک N: بار محور در شرایط خشک منهای شناوری $\rho$ : چگالی آب $C_D$ : ضریب درگ A: مساحت غوطه‌ور عمود بر جهت جریان	نتیجه معادله پایداری ضریب اصطکاک مفروض
۰/۵۲ تا ۰/۶۲	سواری (۰°): ۰/۲۶ (ترمز دستی)، ۰/۷۳ (بدون ترمز دستی)؛ سواری (۹۰°): ۰/۵۶۵ (بدون ترمز دستی)؛ مینی ون (۰°): ۰/۴۲ (ترمز دستی)، ۰/۱ (بدون ترمز دستی)؛ مینی ون (۹۰°): ۰/۶۵ (بدون ترمز دستی)	-	

جدول ۳- خلاصه مطالعات نظری و تجربی- نظری اخیر در زمینه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب از سال ۲۰۲۰-۲۰۱۰ (Shand et al., 2011)

Xia et al. (2014)	Shu et al. (2011)	Xia et al. (2011)	پژوهش شیوه مطالعه
تجربی- نظری	تجربی- نظری	نظری	نوع وسیله نقلیه
Honda Accord, Audi Q7	Ford Focus, Ford Transit, Volvo XC90	اعتبار سنجی فرمول به دست آمده بر اساس نتایج تجربی (Teo (2010)	دوره زمانی وسیله نقلیه
کتونی	کتونی	کتونی	فاصله شاسی وسیله
۰/۱۵۵ تا ۰/۲۰۶	۰/۱۰۱، ۰/۱۶۶، ۰/۲۱۸	۰/۱۴۹، ۰/۱۷۷، ۰/۲۲۵	نقلیه مدل از سطح زمین (m)
۱:۱۴ تا ۱:۲۴	۱:۱۸	-	مقیاس
۰° تا ۱۸۰° (موازی با جهت جریان) ۹۰° (عمود بر جهت جریان)	موازی با جهت جریان مثلاً ۰° و ۱۸۰° درجه (جریان آب به وجوه جلو و عقب وسایل نقلیه برخورد می کند)	موازی با جهت جریان (جریان آب به وجه عقب وسایل نقلیه برخورد می کند)	زاویه قرارگیری
جزئی	جزئی	کامل	استغراق
لایه نازک سیمان	سطح خیس	-	نوع سطوح
۰/۰۲ و ۰/۰۱	مسطح	-	شیب زمین
۰/۱۸ تا ۰/۵۵	۰/۱۶ تا ۰/۶۲	۰/۳ تا ۳	محدوده عمق های استفاده شده (m)
۵/۴ تا ۱/۴	۰/۱۸ تا ۶/۲۴	۰/۵ تا ۴	محدوده سرعت های استفاده شده (m/s)
۰/۴۵ (هموندا) و ۰/۶۷ (آئودی)	موجود نیست	موجود نیست	عمق شناوری (m)
موازی: $U_C = \alpha \times \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2gl_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{\rho_c h_c}{\rho_w h_b}\right)}$ عمود: $U_C = \alpha \times \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2gb_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{\rho_c h_c}{\rho_w h_b}\right)}$	$U_C = \alpha \times \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2.g.l_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w}\right)}$ α و β: پارامترهای تجربی برای هر نقلیه y و h <sub>c</sub> : عمق آب و ارتفاع وسیله نقلیه ρ <sub>w</sub> و ρ <sub>c</sub> : چگالی وسیله نقلیه و آب h <sub>b</sub> : عمق شناوری l <sub>c</sub> : طول وسیله نقلیه	$U_C = \alpha \times \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2g \left(\frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_w}\right) h_c}$ α و β: پارامترهای تجربی برای هر نقلیه y و h <sub>c</sub> : عمق آب و ارتفاع وسیله نقلیه ρ <sub>w</sub> و ρ <sub>c</sub> : چگالی وسیله نقلیه و آب	نتیجه معادله ناپایداری
۰/۲۵ (موازی) و ۰/۷۵ (عمود)	۰/۳۹ (Transit)، ۰/۵ (Ford Focus)، ۰/۶۸ (Volvo)	-	ضریب اصطکاک مفروض

FLO-LOW باهدف مدیریت خطر سیل در جاده‌ها ارائه کردند. درواقع یک ابزار تصمیم‌گیری آنلاین برای کاربران در جاده‌ها است که به آن‌ها کمک می‌کند تا برای عبور از مناطق با ارتفاع کم و مستعد سیل تصمیم‌گیری کنند. به طور کل این سیستم شامل ماژول‌هایی برای آنالیز و هشدار سیل و ورودی و خروجی (I/O) است. همچنین شامل یک پایگاه داده برای سیل نیز می‌باشد. کاربر در این اپلیکیشن قادر است اطلاعات مربوط به وسیله نقلیه و شرایط جریان را وارد کند و اپلیکیشن پس از آنکه نیروهای هیدرودینامیکی وارده را محاسبه کرد، پیام مربوط به هشدار سیل را به کاربر می‌فرستد.

مطالعه تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در حرکت در سیلاب همان‌طور که بیان شد مطالعات چندانی در خصوص ناپایداری

در روندی دیگر (Milanesi and Pilotti (2020) مدلی مفهومی جهت تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب بر روی سطحی با شیب θ برای دو حالت موازی و عمود بر جریان ارائه دادند که مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) است. آن‌ها همچنین مجموعه‌هایی بهینه از ضرایب درگ و لیفت با مقادیر C<sub>D</sub> = 0.98 و C<sub>L</sub> = 0.13 برای وسایل نقلیه عمود بر جهت جریان و C<sub>D</sub> = 0.86 و C<sub>L</sub> = 0.06 برای وسایل نقلیه موازی با جریان برای خودروهایی با استغراق جزئی ارائه کردند. در این دو رابطه U سرعت برحسب متر بر ثانیه و h ارتفاع آب برحسب متر است.

$$U \leq \left[ \frac{(604 - 685 \tan \theta - 1218h) \cos \theta}{38h + 1} \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$U \leq \left[ \frac{(390 - 443 \tan \theta - 788h) \cos \theta}{68h - 1} \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

(Mustaffa et al., (2020) یک اپلیکیشن کاربردی با نام



برای پر کردن خلأهای علمی از آن‌ها به‌عنوان شاهد استفاده شده است. در این راهنما (Shand et al., 2011) مقایسه‌ای جامع و کامل بین راهنمای قبلی، مطالعات تجربی و نظری انجام دادند و توصیه‌هایی در این زمینه ارائه کردند. AR&R شامل هشت نظریه با نام‌های اداره کارهای عمومی<sup>۱</sup> (۱۹۸۶)، مؤسسه مهندسان استرالیا<sup>۲</sup> (۱۹۸۷)، آب ملبورن<sup>۳</sup> (۱۹۹۶)، مدیریت بحران دولت استرالیا و کوئینزلند<sup>۴</sup> (۲۰۰۲)، موور و پاور<sup>۵</sup> (۲۰۰۲)، وزارت برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها و منابع طبیعی (NSW) (۲۰۰۵) و Austroads (2008) می‌باشد. فقط ۳ پژوهش تجربی و نظری (Gordon and Stone (1973), Bonham and Hattersley (1967) و Keller and Mitsch (1993) در پروژه (2011) AR&R بررسی شده است (دیگر مطالعات بیان شده در قسمت‌های قبلی به دلیل آنکه تقریباً هم‌زمان یا بعد از این پروژه منتشر شدند مورد ارزیابی قرار نگرفتند). در این راهنما وسایل نقلیه به ۳ دسته کوچک، بزرگ و بزرگ 4WD تقسیم شده‌اند و برای هر یک، یک تابع حد پایداری یعنی حداکثر سرعت در حداکثر عمق آب (عمق شناوری) (v.y) ارائه می‌شود (Martinez-Gomariz et al., 2018). خلاصه‌ای از نظریه‌های موجود در AR&R در جدول (۴) آورده و توابع حدی آن‌ها نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.

در (2011) AR&R مقدار عمق شناوری برای ماشین‌های کوچک ۰/۳ متر می‌باشد که کمتر از مقداری است که Bonham and Hattersley (1967) پیشنهاد کردند ولی با مقداری که وزارت کارهای عمومی (PWD) (۱۹۸۶) و AusRoads (2008) منتشر کردند، مطابقت دارد. همین مقدار برای خودروهای بزرگ ۰/۴ متر است که توسط Keller and Mitsch (1993) پیشنهاد شده بود. عمق شناوری برای خودروی بزرگ 4WD برابر با ۰/۵ متر است که در محدوده ارائه شده در آزمایش‌های Bonham and Hattersley (1967) برای خودرو Ford Falcon قرار دارد (Shand et al., 2011). Shah et al. (2019) تمامی معیارها و نظریه‌های ارائه شده در راهنما بارش و رواناب استرالیا را به طور کامل شرح داده و ارزیابی نمودند. آن‌ها در نهایت ضمن مقایسه این معیارها با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات اولیه و اخیر اظهار داشتند معیارهای ارائه شده در (2011) AR&R برای تعیین آستانه ناپایداری خودروهای قدیمی پارک شده و همچنین خودروهای مدرن پارک شده و در حرکت در هنگام وقوع سیل همچنان معتبر و قابل اطمینان است و می‌توان از آن استفاده نمود.

وسایل نقلیه در حال حرکت در سیلاب صورت نگرفته است. Shah et al., (2020) تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی بر روی خودروهای در حال حرکت در زمان وقوع سیل را در وضعیت استغراق جزئی بر روی سطح بدون شیب بررسی کردند. آن‌ها برای دستیابی به این هدف خودرو Perodua Viva با مقیاس ۱:۱۰ را داخل فلوم آزمایشگاهی در جریان زیر بحرانی قرار دادند. بعلاوه در این مطالعه تغییرات عدد فرود با مدنظر قراردادن نیروهای هیدرودینامیکی مورد بررسی و بحث قرار گرفت. محققین مزبور رابطه (۱۲) را برای محاسبه سرعت در آستانه لیز خوردن خودروهای در حرکت ارائه نمودند. نتایج حاصل نشان داد که رابطه خوبی بین مقادیر برداشت شده در آزمایشگاه و مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه (۱۲) با ضریب همبستگی  $R^2 = 0.85$  برقرار است. همچنین مشخص گردید نیروی شناوری در اعماق مساوی و بزرگ‌تر از ۰/۴۵۷ متر بر نیروی وزن خودرو با مقیاس مذکور غلبه می‌کند. (رابطه ۱۲)

$$v = \sqrt{2 \frac{(w - \rho g V)b + ((w - \rho g V)\mu + ma) \cdot \sqrt{(r+b) \cdot (r-b)}}{\sqrt{(r+b) \cdot (r-b)} \cdot \rho C_D A_D}}$$

در رابطه فوق  $v$  سرعت در آستانه لیز خوردن (m/s)،  $W$  وزن خودرو،  $V$  حجمی از خودرو است که در آب قرار دارد. همچنین  $m$  جرم خودرو،  $r$  شعاع لاستیک،  $b$  فاصله مرکز محور تا قسمتی از لاستیک است که در اثر چرخش دیگر روی زمین نیست.

#### راهنمای بارش و رواناب استرالیا (AR&R)

به‌غیر از روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی و میدانی، روش‌هایی نظری و مبتنی بر تجربیات و نظرات کارشناسی وجود دارد که عموماً با این اعتقاد توسعه داده شده‌اند که روش‌های آزمایشگاهی و تجربی با توجه به متغیر بودن معیارهای طراحی در انواع وسایل نقلیه و همچنین عدم قطعیت زیاد موجود در هیدرولوژی و هیدرولیک سیلاب و همچنین وضعیت استقرار وسایل نقلیه در زمان بروز سیلاب، نمی‌توانند نتایج قابل‌اعتمادی را به دست دهند. در میان معدود نظریه‌های موجود که اغلب تبدیل به استاندارد کشورهای توسعه‌یافته نیز شده‌اند، معیارهای پیشنهاد شده در راهنمای بارش و رواناب استرالیا (AR&R) از اصلی‌ترین منابع ارائه شده در زمینه تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب می‌باشند. نسخه به‌روزرسانی شده (AR&R (1987) و شامل ۲۱ پروژه می‌باشد که

<sup>۴</sup>Emergency Management Australia and Queensland Government

<sup>۵</sup>Moore and Power

<sup>۶</sup>New South Wales Government

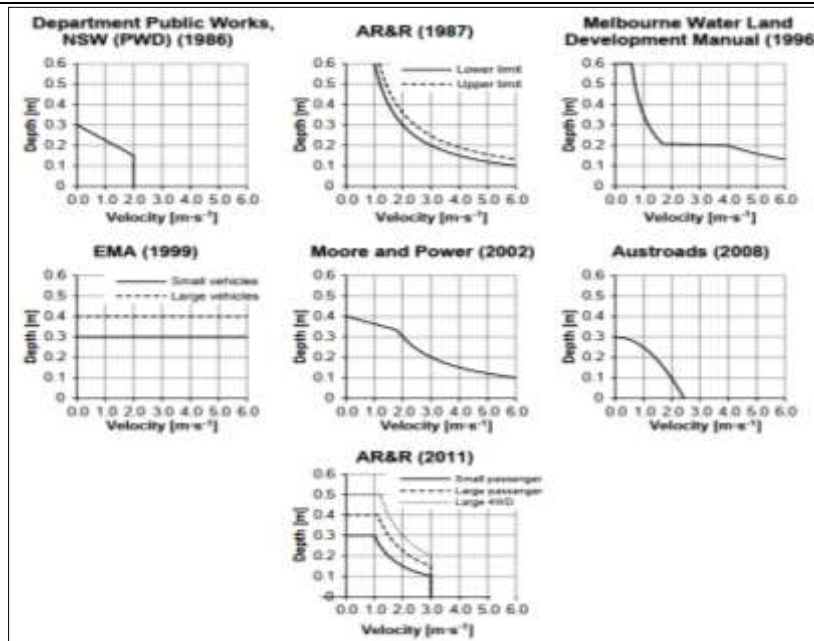
<sup>۱</sup>Department of Public Works

<sup>۲</sup>Institution of Engineers Australia

<sup>۳</sup>Melbourne Water

جدول ۴. خلاصه هشت نظریه ارائه شده در راهنمای بارش و رواناب استرالیا (Shand et al., 2011)

راهنما	عمق حداکثر (m)	سرعت حداکثر (m/s)	v.y حداکثر (m <sup>2</sup> /s)	دیگر
وزارت کارهای عمومی (۱۹۸۶)، NSW	۰/۳	۲	-	$\frac{-11V + 33}{y} < 1$
بارش و رواناب استرالیا (مؤسسه مهندسين استرالیا، ۱۹۸۷)	-	-	۰/۷ - ۰/۶ بسته به اندازه وسیله نقلیه	-
آب ملبورن راهنمای توسعه زمین: معیارهای ایمنی مسیل (۱۹۹۶)	۰/۶	-	۰/۶ ≤ برای عمق متوسط کوچکتر مساوی ۰/۱ متر؛ ۰/۸ ≤ برای عمق متوسط برابر با ۰/۲ متر؛ ۰/۳۵ ≤ برای عمق متوسط بزرگتر ۰/۳ متر	-
راهنمای مدیریت بحران استرالیا (EMA) (۱۹۹۷)	-	-	-	y > 750 mm
راهنمای مدیریت بحران استرالیا (EMA) (۱۹۹۹)	۰/۳ (خودروهای کوچک و سبک)؛ ۰/۴ (خودروهای بزرگتر با شاسی بلند)	-	-	-
موور و پاور (۲۰۰۲)	-	-	-	$y \leq (0.4 - 0.0376 v)$ for $[v \leq 1.81 \text{ m/s}]$ ; $(v y) \leq 0.6$ for $[v > 1.81 \text{ m/s}]$
راهنمای توسعه سیلاب دشت (۲۰۰۵)	۰/۳	۲	-	$\frac{-11V + 33}{y} < 1$
Austrads (2008)	-	-	-	$y + \frac{v^2}{2g} \leq 0.3$
بارش و رواناب استرالیا. پروژۀ ۱۰: معیار مناسب برای ایمنی وسایل نقلیه (۲۰۱۱)	۰/۳ (خودروهای کوچک)؛ ۰/۴ (خودروهای بزرگ)؛ ۰/۵ (بزرگ 4WD)	۰/۳	۰/۳ ≤ (خودروهای کوچک)؛ ۰/۴۵ ≤ (خودروهای بزرگ)؛ ۰/۶ ≤ (بزرگ 4WD)	-



شکل ۳- نمایش تمام توابع حد پایداری وسایل نقلیه در سیلاب بر اساس سرعت و عمق ارائه شده در راهنمای بارش و رواناب استرالیا (Martinez-Gomariz et al., 2018)

محدوده‌های مشخصی از عمق و سرعت از منحنی و شاخص هیدرودینامیکی خودروهای کوچک ارائه شده در (AR&R 2011)

(Golmohammadi & Shokoohi (2021) در مطالعه‌ای با هدف تعیین میزان خسارت وسایل نقلیه در سیلاب در

نمونه آزمایشگاهی آن‌ها در زمان شروع حرکت بیشتر در آب مستغرق می‌شود. برای غلبه بر چنین محدودیت‌هایی، پارامتر چگالی نسبی در فرمول به‌دست‌آمده گنجانده شد. با این وجود، عمق شناوری در این مطالعه در نظر گرفته نشد؛ بنابراین، با ارائه فرمول مذکور اعماقی به دست می‌آید که حتی فراتر از ارتفاع خودرو است و بعلاوه، پارامتر نیروی لیفت در آن در نظر گرفته شده است. با این حال Teo (2010) ضمن تخمین اثر نیروی عمودی فشار از پارامترهای نیروی لیفت صرف نظر کردند.

Xia et al., (2014) و Shu et al., (2011) روابطی برای تعیین آستانه ناپایداری خودروها با زوایای قرارگیری صفر، ۹۰ و ۱۸۰ درجه ارائه دادند. آن‌ها عقیده داشتند اگر وسیله نقلیه عمود بر جهت جریان باشد (جریان به وجوه راست و چپ وسیله نقلیه برخورد کند)  $A_D = ad(hc \times bc)$  و اگر وسیله نقلیه موازی با جهت جریان باشد (جریان به وجوه عقب و جلو خودرو برخورد کند)  $A_D = ad(hc \times lc)$  است. در صورتی که Milanesi and Pilotti (2020) برعکس این را بیان کردند یعنی در صورتی که خودرو موازی با جریان باشد، عرض آن یعنی  $bc$  متأثر از جریان است. همچنین اگر خودرو عمود بر جریان باشد، طول آن یعنی  $lc$  متأثر از جریان می‌باشد. به نظر می‌رسد روابط پیشنهادشده به منظور محاسبه  $A_D$  توسط Milanesi and Pilotti (2020) درست است بنابراین روابط (۵) و (۷) باید اصلاح شوند.

لازم به ذکر است در صورتی می‌توان از نتایج حاصل از مطالعات تجربی انجام‌شده استفاده کرد که چگالی و نحوه طراحی خودرو موردنظر کاملاً مشابه با خودروهای مورد استفاده در آزمایشگاه باشد. بعلاوه در معادلات و خروجی‌های مطالعات انجام‌شده پارامترهایی از قبیل  $\alpha$  و  $\beta$  و غیره وجود دارند که به کمک نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده‌اند. به همین دلیل استفاده از این روابط در پژوهش‌های نظری ممکن نیست لذا باید به دنبال روشی بود تا بتوان از آن در مطالعات تئوری نیز بهره برد.

#### نقاط قوت و ضعف نظریه‌های ارائه‌شده در AR&R

نتایج ارائه‌شده در مطالعات تجربی اغلب برای همان مقیاس مدنظر ارائه شده‌اند و به‌منظور استفاده برای خودروها با مقیاس کامل چندان موفق نبوده‌اند و بنابراین استفاده از این نتایج محدود است. از طرفی در مطالعات آزمایشگاهی انواع مشخصی از وسایل نقلیه مدنظر بوده است و نتایج ارائه‌شده نیز برای همان نوع از وسایل نقلیه قابل استفاده است و قابل تعمیم به خودروهای دیگر نیست. اما معیارهای ارائه‌شده در راهنمای بارش و رواناب استرالیا به راحتی برای خودروها در مقیاس واقعی قابل استفاده هستند. در مطالعات اخیر به‌منظور تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه، علاوه

استفاده نمودند. آن‌ها ابتدا با بررسی شاخص هیدرودینامیکی  $D.V \leq 0.3$  و منحنی مربوطه و مدنظر قراردادن حد نهایی عمق (یک متر) در نمودار عمق- خسارت HAZUS-MH، منحنی خودروهای کوچک در (AR&R (2011) را تا عمق یک متر بسط دادند. سپس منحنی به‌دست‌آمده را با نمودار HAZUS-MH به کمک فصل مشترک آن یعنی عمق تلفیق نمودند. در نهایت با زون بندی سطح زیر منحنی به‌دست‌آمده و برداشت مقدار خسارت از نمودار HAZUS-MH، مقادیر خسارت خودروهای کوچک در سیلاب را در هر زون و در محدوده‌های مشخصی از عمق و سرعت تعیین کردند.

نقاط قوت و ضعف مطالعات اولیه و اخیر برای خودروهای ساکن در تحقیقات انجام‌شده اکثر محققین استفاده از ضریب اصطکاک ارائه‌شده توسط Bonham and Hattersley (1967) و تحقیقات آزمایشگاهی مشابه آن را ترجیح می‌دهند در حالی که تعدادی از آن‌ها معتقد بودند می‌توان ضریب اصطکاک را با انجام آزمایش‌هایی به بهترین نحو تعیین کرد. علاوه بر این نتایج حاصل از مطالعات اولیه ممکن است برای وسایل نقلیه معاصر قابل اجرا و به طور دائم قابل استفاده نباشند، زیرا باگذشت زمان خصوصیات وسایل نقلیه تغییراتی داشته‌اند. به‌عنوان مثال در طراحی‌های نوین از شاسی‌های فلزی سبک‌وزن استفاده می‌شود که می‌تواند احتمال شناور شدن وسایل نقلیه در سیلاب را افزایش دهد.

قبل از پژوهش Milanesi and Pilotti (2020) ارزیابی قابل‌اعتمادی از ضرایب درگ و لیفت انجام‌نشده بود. آن‌ها به‌منظور ارائه مدلی مفهومی برای تعیین آستانه ناپایداری، اقدام به تحلیل وضعیت پایداری طیف وسیعی از وسایل نقلیه روی سطحی با شیب  $\theta$  نمودند و مجموعه‌هایی بهینه از  $C_L$  و  $C_D$  ارائه کردند. آن‌ها مقادیر  $C_D = 0.86$ ،  $C_L = 0.06$  برای وسایل نقلیه موازی جریان و  $C_D = 0.98$ ،  $C_L = 0.13$  برای وسایل نقلیه عمود بر جهت جریان را به دست آورده و پیشنهاد کردند. اعداد پیشنهادشده توسط آن‌ها می‌تواند کمک زیادی به محققین در این زمینه بکند.

Xia et al., (2011) فرمولی برای پیش‌بینی سرعت اولیه وسایل نقلیه در سیلاب باتوجه‌به شرایط مکانیکی ناپایداری از نوع لیز خوردن ارائه دادند. این فرمول بر اساس نتایج تجربی Teo (2010) برای سه وسیله نقلیه مدل با مقیاس کوچک (۱:۴۳) تأیید شد. با آگاهی از اینکه وزن وسایل نقلیه مقیاس‌بندی شده با نمونه واقعی آن‌ها تطابق ندارد، اظهار گردید که در آزمایش‌های انجام‌شده چگالی وسایل نقلیه مقیاس‌بندی شده به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه واقعی آن‌ها بود. این بدان معنی است



کاربردی در ایران و از بین بردن هر چه بیشتر خلاهای علمی در این زمینه ارائه می‌شود.

### معرفی روش قابل استفاده در ایران

نتایج اغلب مطالعات تئوری انجام شده فرمول‌هایی برای محاسبه سرعت یا عمق در آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب می‌باشد. همان‌طور که شرح داده شد، در مطالعات اخیر علاوه بر عمق و سرعت سیل خصوصیات وسایل نقلیه نیز مدنظر محققین بوده است. از این رو استفاده از این روابط می‌تواند دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین نتایج را به همراه داشته باشد ولی این امر به دلیل وجود پارامترهایی که مختص هر نوع از وسایل نقلیه است و به کمک داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، کاری مشکل بوده و عدم قطعیت زیادی را برای مسائل کاربردی نظیر بیمه خودروها در مواجهه با سیلاب به وجود آورده و عملاً آن‌ها را از حالت کاربردی خارج می‌سازد. در این راستا و باتوجه به مطالعات انجام شده تاکنون، آستانه‌های ارائه شده در (AR&R (2011 می‌توانند گزینه بهتری برای تعیین آستانه ناپایداری خودروهای رایج در ایران باشند زیرا می‌توان از آن‌ها برای تعیین آستانه خودروها با مقیاس واقعی استفاده نمود و همچنین پیچیدگی خاصی در روابط پایداری ارائه شده در آن‌ها وجود ندارد.

### پیشنهادهایی برای شروع تحقیقات کاربردی در ایران

استفاده از یک شاخص هیدرودینامیکی با مقادیر ثابت در سه دسته وسایل نقلیه مطرح در (AR&R (2011 باتوجه به تفاوت ساختاری و فیزیکی بین وسایل نقلیه در هر دسته، می‌تواند نتایج درست و قابل اعتمادی را به همراه نداشته باشد؛ بنابراین لازم است برای دستیابی مقادیر عمق و سرعت در آستانه ناپایداری خودروهای رایج در ایران، مطالعات آزمایشگاهی با در نظر داشتن طیف وسیعی از انواع وسایل نقلیه انجام شود و نتایج آن‌ها برای خودروها با مقیاس واقعی ارائه گردد. برای دستیابی به نتایجی که بتوان از آن‌ها برای اهدافی از جمله تعیین خسارات وسایل نقلیه مورد استفاده در ایران استفاده نمود، انجام آزمایش‌های متعددی برای تعیین آستانه ناپایداری انواع مختلف خودروهای مورد استفاده در ایران ضروری است. بعلاوه برای استفاده از روابط ارائه شده در مطالعات انجام شده لازم است تا ضرایبی از قبیل  $\alpha$  و  $\beta$  که برای هر نوع از خودروها متفاوت است موجود باشند. برای این منظور نیز لازم است تا مطالعات تجربی با استفاده از خودروهای ایرانی انجام شود و مقادیر پارامترهای مذکور به کمک رگرسیون به دست آید. همان‌طور که گفته شد، در تمامی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده از مدل‌های فیزیکی با مقیاس‌های متفاوت استفاده شده است. نتایج این مطالعات نیز

بر عمق و سرعت سیلاب خصوصیات وسایل نقلیه مختلف و پارامترهای مرتبط نیز مورد توجه بوده است؛ بنابراین عمق یا سرعت در آستانه ناپایداری که با استفاده از این روابط به دست آید مختص خودرویی مشخص خواهد بود. در صورتی که در راهنمای بارش و رواناب استرالیا صرفاً عمق و سرعت سیل مدنظر بوده است و در (AR&R (2011 وضعیت پایداری و ناپایداری وسایل نقلیه در هر دسته با داشتن مقدار شاخص هیدرودینامیک D.V مشخص می‌شود. اگرچه استفاده از روابط ارائه شده در مطالعات اخیر نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را به همراه دارد ولی برای استفاده از آن‌ها باید خصوصیات وسایل نقلیه مختلف و پارامترهای مربوطه از جمله  $\alpha$  و  $\beta$  موجود باشد که رسیدن به این مقصود نیازمند انجام تحقیقات آزمایشگاهی برای هر نوع از وسایل نقلیه است.

استفاده از آستانه ناپایداری خودروها در سه دسته کوچک، بزرگ و بزرگ 4WD در راهنمای بارش و رواناب استرالیا این انعطاف را به راهنمای مزبور می‌دهد که می‌توان از آن به سهولت برای تعیین وضعیت پایداری خودرو در سیلاب استفاده نمود ولی همین سهولت، عدم قطعیت زیادی را باتوجه به تنوع زیاد خودروها در هر دسته ایجاد می‌کند که افزایش اعتمادپذیری نتایج را محتاج رصد دائمی کارشناسان خبره برای انواع وسایل نقلیه می‌نماید. لازم به ذکر است در توابع حدی ارائه شده در راهنمای بارش و رواناب استرالیا (۲۰۱۱) فقط عمق شناوری مدنظر است؛ بنابراین با استفاده از این راهنما فقط ناپایداری از نوع شناوری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد در صورتی که ممکن است ماشین قبل از آنکه شناور شود در اثر وارد آمدن نیروی درگ لیز بخورد و ناپایدار شود. از طرفی دیگر، در مطالعات صورت گرفته و روابط ارائه شده برای تعیین آستانه لیز خوردن خودروها، پارامترهایی وجود دارد که مقادیر قابل اعتماد و مشخصی برای آن‌ها موجود نیست و فقط برای خودروهای مشخصی در آزمایشگاه به دست آمده‌اند؛ لذا تعیین این آستانه به صورت تئوری ممکن نیست و تابع حدی هم تاکنون برای آن پیشنهاد نشده است؛ بنابراین لازم است تا تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت گیرد تا بتوان ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب را در ترکیب دو نوع شناوری و لیز خوردن مورد ارزیابی و بحث قرار داد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله مطالعات انجام شده در زمینه تعیین آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب در قالب مطالعات اولیه در سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۶۰ و مطالعات اخیر در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰ مرور و بررسی شدند. در این بخش ابتدا روش قابل استفاده در ایران معرفی می‌گردد و سپس پیشنهادهایی برای شروع تحقیقات

ممکن است خودرو در آن زمان در حرکت باشد. Shah et al., (2019) بر این باور بودند که می‌توان از معیارهای ارائه شده در AR&R برای تعیین آستانه خودروهای در حرکت نیز استفاده نمود اما با توجه به مطالب بیان شده لازم است بررسی‌های هیدرودینامیکی و مطالعات بیشتری در این شرایط نیز صورت گیرد تا بتوان برآورد مطمئنی از آستانه ناپایداری وسایل نقلیه در سیلاب داشت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Arrighi, C., Huybrechts, N., Ouahsine, A., Chassé, P., Oumeraci, H., Castelli, F. (2016). Vehicles' instability criteria for flood risk assessment of a street network. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 143-146.
- Austrroads. (2008). Guide to road design, part 5: drainage design. AustrRoads Inc, Australia, 210
- Bonham, A.J., Hattersley R.T. (1967). Low-level causeways. *Water Research Laboratory, Report no. 100*. University of New South Wales, Australia.
- Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources, (2005), *NSW Floodplain Development Manual*, New South Wales Government, Sydney, Australia.
- Department of Public Works Floodplain development manual. (1986). Sydney, NSW: Department of Public Works, 72.
- Emergency Management Australia and Queensland Government (2002). Disaster loss assessment guidelines (Guide 11). Part III Emergency Management Practice. Volume 3-Guidelines, Canberra, NSW: Emergency Management Australia, 101
- Golmohammadi, R., Shokoohi, A. (2021). Assessing Vehicle Damage in Flood in Urban Areas (Case Study: Shiraz Flood). *Iran-Water Resources Research*. 17(3). 282-301.
- Gordon, A.D., Stone, P.B. (1973). Car stability on-road floodways. *National Capital Development Commission, Report no. 73/12*. Water Research Laboratory, University of New South Wales, Australia.
- Keller, R.J., Mitsch, B. (1993). Safety aspects of the design of roadways as floodways. *Urban Water Research Association of Australia*. ISBN: 1875298703.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Djordjević, S. (2017). A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding. *Urban Water Journal*, 14(9), 930-939.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Djordjević, S. (2018). Stability criteria for flooded vehicles: A state-of-the-art review. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S817-S826.
- Milanesi, L., Pilotti, M. (2020). A conceptual model of vehicles stability in flood flows. *Journal of Hydraulic Research*, 58(4), 701-708
- Moore K. Power R. (2002). Safe buffer distances for off-stream earth dams. *Aust J Water Resour*, 6, (1), 1-15
- Mustaffa, Z., Al-Qadami, E. H. H., Shah, S. M. H., Yusof, K. W. (2020). Impact and mitigation strategies for flash floods occurrence towards vehicle instabilities. In *Flood Impact Mitigation and Resilience Enhancement*. Intech Open.
- Pilgrim, E., Institution of Engineers, Australia, Pilgrim, D. H., Canterford, R. P. (1987). *Australian rainfall and runoff*. Institution of Engineers, Australia.
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Yusof, H.W. (2019). Numerical Framework to Determine Instability Modes for Static Vehicles under Partial Submergence. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(2).
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Yusof, K. W. (2017). Disasters worldwide and floods in the Malaysian Region: a brief review. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(2).
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Martínez-Gomariz, E., Kim, D. K., Yusof, K. W. (2019). The criterion of vehicle instability in floodwaters: past, present, and future. *International Journal of River Basin Management*, 19(1), 1-23.
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., & Yuof, K. W. (2018). Instability criteria for vehicles in motion exposed to flood risks. In *MATEC Web of Conferences (Vol. 203, p. 07003)*. EDP Sciences.
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Martínez-Gomariz, E., Yusof, K. W., Al-Qadami, E. H. H. (2019). A review of safety guidelines for vehicles in floodwaters. *International Journal of River Basin Management*, 19(1), 25-41.
- Shand, T. D., Cox, R. J., Blacka, M. J., Smith, G. P. (2011). Australian rainfall and runoff project 10: Appropriate safety criteria for vehicles. *Tech. Rep.; Eng*
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R. A., Lin, B. (2011). Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of hydraulic research*, 49(6), 709-717.
- Smith, G. (2015). Expert opinion: Stability of people, vehicles, and buildings in floodwater. *Water*

برای همان مقیاس‌ها ارائه شده‌اند و امکان بسط آن‌ها برای وسایل نقلیه مشابه با مقیاس کامل می‌تواند منجر به برآورد توأم با خطا گردد. از این رو لازم است برای استفاده از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی که برای خودروهای مقیاس‌بندی شده ارائه می‌شوند، نسبت‌ها و ضرایبی ارائه گردند تا بتوان از آن‌ها برای وسایل نقلیه به مقیاس کامل استفاده نمود.

تمرکز اکثر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بر روی خودروهای پارک شده در هنگام وقوع سیل است در صورتی که



- Research Laboratory, Technical Report, 11.
- Smith, G. P., Modra, B. D., Felder, S. (2019). Full-scale testing of stability curves for vehicles in floodwaters. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S2), e12527.
- Teo, F. Y. (2010). *Study of the hydrodynamic processes of rivers and floodplains with obstructions*. Cardiff University (United Kingdom).
- Toda, K., Ishigaki, T., Ozaki, T. (2013). Experiments study on a floating car in flooding. In *International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe* (Vol. 6).
- Water, M. (1996). Melbourne water land development manual, Appendix A: Floodway safety criteria. *Melbourne Water Technical Working Group: R Sutherland, T Jones, N Craigie*.
- Woods, K.B., Berry, D.S., Goetz, W.H. (1960). *Highway engineering handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Xia, J., Falconer, R. A., Xiao, X., Wang, Y. (2014). The criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Natural hazards*, 70(2), 1619-1630.
- Xia, J., Teo, F. Y., Lin, B., Falconer, R. A. (2011). The formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*, 58(1), 1-14.