

## شبیه‌سازی عبور خودروی شنی‌دار از موانع

سعید ابراهیمی\*

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه یزد

ebrahimi@yazd.ac.ir

علی کلاهدوزان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

اصغر مهدیان

استادیار گروه مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

niloo1112@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

### چکیده

از جمله قابلیت‌های مهم خودروهای شنی‌دار، توانایی عبور آنها از ناهمواری‌هاست. گودال‌ها و دیوارهای عمودی در مقابل حرکت، نمونه‌ای از ناهمواری‌های رایج در برابر این نوع خودروها هستند که می‌توانند به‌طور قابل توجهی حرکت خودرو را تحت تأثیر قرار دهند و مانع از ادامه حرکت شوند. صحت‌سنجی این قابلیت پس از یافتن یک مدل نظری جهت تحلیل و هزینه زیاد ناشی از آزمایش روی این نوع خودروها، لزوم شبیه‌سازی نرم‌افزاری را دوچندان می‌کند. در این مقاله برای صحت‌سنجی از نرم‌افزار ادامز استفاده شده است، اما با توجه به تعداد زیاد قطعات، قیود و تماس بین آنها، استفاده از محیط عمومی این نرم‌افزار به شیوه‌های رایج عملاً ناممکن است. این تحقیق با شیوه‌های نوین با کدنویسی در این نرم‌افزار، بر این مشکل فائق آمده است. شبیه‌سازی و تحلیل دینامیکی حرکت یک خودروی شنی‌دار حین عبور از گودال و دیوار عمودی و پیش‌بینی قابلیت عبور آن از جمله دستاوردهای این مقاله است که اطلاعات وسیعی از رفتار تک‌تک قطعات حین عبور از این موانع و نیروهای وارده به آنها در مقابل طراحان این نوع خودرو قرار خواهد داد. مقایسه نتایج این مقاله با نرم‌افزار ادامز صحت روش ارائه شده را تأیید می‌کند.

**واژگان کلیدی:** خودروی شنی‌دار، دینامیک چندجسمی، شبیه‌سازی، قابلیت عبور از مانع

### ۱. مقدمه

پیش‌بینی قابلیت عبور آن از جمله موارد بسیار مهم در طراحی خودروی شنی‌دار به حساب می‌آید. این قابلیت به دلیل وجود شنی و در نتیجه زیادبودن سطح تماس بین شنی و زمین در این نوع خودروهاست. شنی به کمک چرخ دندانه‌دار<sup>۱</sup>، که به موتور خودرو و بدنه متصل است، به حرکت درمی‌آید. حلقه شنی از کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی کفشک فولادی، که توسط سطح لاستیکی به یکدیگر

از گذشته تا به امروز، خودروهای شنی‌دار<sup>۱</sup> از جمله مهمترین تجهیزات مورد استفاده در صنایع مختلف بوده‌اند. برخی از ربات‌ها، بیل‌های مکانیکی، بولدوزرها، جرثقیل‌ها و تانک‌ها نمونه‌هایی از این نوع خودروها هستند. یکی از قابلیت‌های مهم خودروهای شنی‌دار، توانایی عبور آنها از ناهمواری‌هاست. شبیه‌سازی و تحلیل دینامیکی حرکت یک خودروی شنی‌دار حین عبور از گودال و دیوار عمودی و

متصل شده‌اند، به‌وجود آمده است؛ لذا این خودرو دارای قطعات زیادی است. تعداد بالای این قطعات لزوم استفاده از روش دینامیک چندجسمی را نشان می‌دهد. دینامیک سیستم‌های چندجسمی شاخه‌ای جدید از علم دینامیک است که طی سال‌های اخیر، با هدف مدلسازی و شبیه‌سازی سیستم‌های مکانیکی پیچیده توسعه یافته است [۱]. در این شاخه از علم دینامیک، روابط دینامیک کلاسیک با استفاده از جبر خطی به‌صورت ماتریسی فرمول‌بندی می‌شود و سپس به‌کمک روش‌های محاسبات عددی حل می‌شوند. نرم‌افزار ادامز<sup>۳</sup> نیز بر همین پایه توسعه یافته است. در این نرم‌افزار به‌غیر از محیط اصلی، که برای کاربردهای عمومی تعبیه شده است، ماژول‌های مخصوصی وجود دارد که روند مدلسازی و تحلیل را تسریع و بهینه می‌کند. برخی از این محیط‌ها مثل محیط ادامز کار<sup>۴</sup> به‌صورت رایگان در خود نرم‌افزار موجود است. اما برخی دیگر مثل محیطی که مخصوص شبیه‌سازی خودروهای شنی است، که به اختصار به آن ای. تی. وی<sup>۵</sup> گفته می‌شود، تنها با پرداخت هزینه‌ای بالا آن‌هم صرفاً برای برخی کشورها قابل استفاده است. این محیط برای طراحی و شبیه‌سازی خودروهای شنی‌دار است و تمامی قطعات مورد نیاز این نوع خودرو به‌صورت آماده در آن تعبیه شده است [۲]. متأسفانه صنعت کشور اجازه دسترسی به این محیط از نرم‌افزار را ندارد. از طرفی با توجه به تعداد زیاد قطعات، قیود و تماس بین آنها در این خودروها، استفاده از محیط عمومی نرم‌افزار ادامز به شیوه‌های رایج عملاً ناممکن است.

در زمینه مدلسازی و شبیه‌سازی خودروهای شنی‌دار، بین<sup>۶</sup> و شائو<sup>۷</sup> به معرفی کاربرد نرم‌افزار ادامز مجهز به محیط ای. تی. وی. پرداختند [۳]. هدف آنها بررسی قابلیت این ماژول در مورد این نوع خودروها در مواجهه با سه مانع مختلف بود. مهدیان در گزارش خود تحت عنوان تئوری عملکرد تانک به بررسی و تحلیل پارامترهای مختلف مؤثر در حرکت این نوع خودرو پرداخت [۳] وانگ<sup>۸</sup> و همکاران نیز به

شبیه‌سازی یک خودروی شنی‌دار که جهت استخراج در کف اقیانوس‌ها کاربرد داشت، پرداختند. آنها به کمک محیط ای. تی. وی. به بررسی تغییر مکان و سرعت مرکز جرم خودرو حین حرکت در زمین هموار و دارای شیب پرداختند. آنها نوع زمین و تماس بین قطعات را به کمک قابلیت پیش‌فرض محیط ای. تی. وی. تعیین نمودند [۵]. رجبی و همکاران با در نظر گرفتن سه نوع ربات شنی‌دار مختلف، قابلیت حرکت آنها را حین عبور از دیوار عمودی با هدف یافتن بیشترین ارتفاع، تحلیل و آزمایش کردند [۶]. مادن<sup>۹</sup> و همکاران نیز به‌کمک شبیه‌سازی مدل ساده‌ای از شنی و بدنه در محیط ای. تی. وی.، تغییر پاسخ دینامیکی مدل در شرایط مختلف با نیروی پیشران متفاوت را بررسی نمودند [۷]. ماتج<sup>۱۰</sup> با در نظر گرفتن یک مدل ساده از خودروی شنی‌دار و صرف‌نظر از اصطکاک بین کفشک‌های شنی با چرخ‌ها، رفتار خودرو را حین عبور از یک مانع نیم‌دایره‌ای در محیط عمومی نرم‌افزار شبیه‌سازی نمود [۸]. ژو و وانگ نیز به بررسی قابلیت عبور از موانع خودروهای شنی‌دار به‌کمک شبیه‌سازی در محیط ای. تی. وی. پرداختند [۹]. آنها با هدف پیش‌بینی و افزایش قابلیت خودرو جهت عبور از مانع، رفتار آن را حین شبیه‌سازی تحلیل کردند. کلاهدوزان و همکاران نیز با در نظر گرفتن اصطکاک و دیگر جزئیات، به‌کمک کدنویسی در محیط عمومی نرم‌افزار، بدون توضیح کد و چگونگی ورود فرمت‌های مختلف به ادامز، رفتار خودرو را حین عبور از مانع نیم‌دایره‌ای تحلیل کردند [۱۰]. بانرجی<sup>۱۱</sup> و همکاران با شبیه‌سازی یکی از چرخ‌ها در محیط عمومی نرم‌افزار ادامز، به بررسی خوش‌سواری خودروی شنی‌دار پرداختند [۱۱]. طبق بیان مرجع [۹]، کیونر<sup>۱۲</sup> پس از تحقیقات میدانی بر این عقیده بود که چنانچه مرکز جرم خودروی شنی‌دار در محدوده نیمی از فاصله  $a+b+0.7(r_f+r_r)$  قرار بگیرد، در این صورت نهایت عرض قابل عبور از گودال برای خودرو مطابق رابطه ۱ محاسبه خواهد شد. به‌طوری‌که در این رابطه  $a$  و  $b$  فاصله نقاط انتهایی تا مرکز جرم خودرو

و  $r_f$  و  $r_r$  به ترتیب شعاع چرخ‌های دندانه‌دار و هرزگرد هستند.

$$W = \frac{4}{9} [a + b + 0.7(r_f + r_r)] \quad (11)$$

در این مقاله به کمک تحلیل و شبیه‌سازی در محیط عمومی نرم‌افزار آدامز، قابلیت و امکان‌پذیری عبور خودروی شنی‌دار از روی گودال و مانع دیواره‌ای شکل با هدف پیش‌بینی اینکه خودروی شنی‌دار نهایتاً از چه مانعی می‌تواند عبور کند، مورد بررسی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی که به علت تعداد بالای قطعات خودرو و پیچیدگی تعریف تماس بین اجزاء و زمین‌های مختلف و عدم دسترسی به محیط ای. تی. وی. به کمک راهکارهای خلاقانه و کدنویسی قیود در محیط عمومی نرم‌افزار انجام شده است، اطلاعات وسیعی از رفتار تک‌تک قطعات خودرو همچون جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نیروها در برابر محققان و طراحان قرار خواهد داد.

## ۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی

با توجه به اینکه نرم‌افزار آدامز از دسته نرم‌افزارهای طراحی کامپیوتری محسوب نمی‌شود، تنها به کمک آن می‌توان قطعات خیلی ساده را طراحی کرد. از اینرو طراحی خودروی شنی‌دار با توجه به تعداد بالای قطعات و پیچیدگی شکل آنها، در این نرم‌افزار ممکن نیست و لازم است خودروی شنی‌دار طراحی شده در یکی از نرم‌افزارهای طراحی همچون سالیدورکس<sup>۱۳</sup> را وارد این نرم‌افزار کرد. متأسفانه وارد کردن مدل از نرم‌افزارهای دیگر دو مشکل ایجاد می‌کند: نخست بالارفتن زمان شبیه‌سازی است که گاهی تا چند ده برابر هم می‌شود؛ مشکل دیگر اینکه تنها شکل شماتیک آن وارد محیط نرم‌افزار می‌شود و لازم است جرم، ممان اینرسی و بقیه مشخصات دینامیکی برای تک‌تک قطعات ابتدا تعیین و سپس به نرم‌افزار داده شود. در این قسمت با هدف یافتن مناسب‌ترین فرمتی که بتواند از نرم‌افزار سالیدورکس به آدامز وارد شود، تک‌تک فرمت‌ها با وجود آنکه زمان قابل توجهی جهت خروج<sup>۱۴</sup> از سالیدورکس

و ورود<sup>۱۵</sup> به آدامز لازم داشتند، ارزیابی شدند. تعداد زیادی از آنها قابلیت ورود به آدامز را نداشتند. تعداد محدود فرمت‌هایی که به محیط این نرم‌افزار وارد شدند نیز مشکلات خاص خود را داشتند که تفاوت آنها در جدول ۱ ذکر شده است.

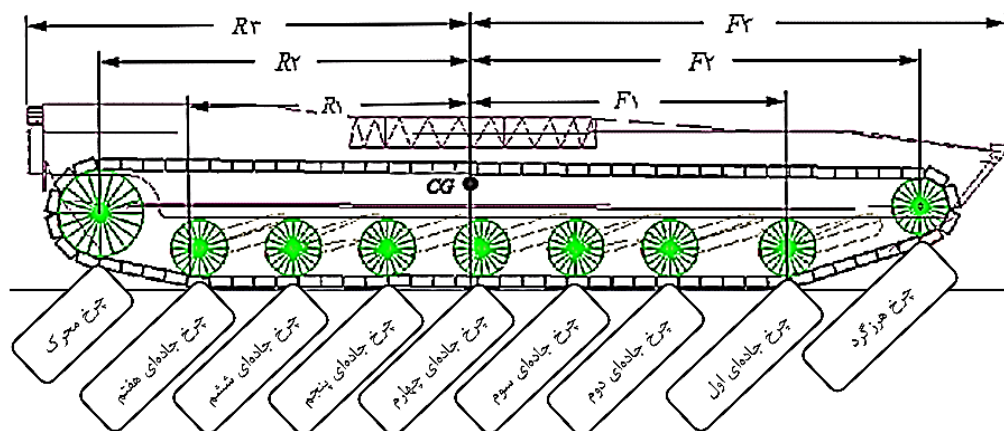
پس از بررسی فرمت‌های مختلف و ارزیابی مشکلات ناشی از استفاده هر مورد، از فرمت پاراسلاید<sup>۱۶</sup> استفاده شد. هر قدر حجم فایل ایجاد شده بیشتر باشد، مدت زمان شبیه‌سازی طولانی‌تر می‌شود و امکان قفل شدن بیشتر است. در نرم‌افزارهای تحلیلی همچون آدامز برای سادگی و تسریع مدل‌سازی، محیطی گرافیکی تعبیه شده است. در این محیط جهت تعریف هندسه، قیود، نیروهای داخلی و خارجی، تماس بین قطعات و دیگر الزامات مدل‌سازی آیکون‌هایی در نظر گرفته شده است. با کلیک روی هر آیکون برحسب قابلیت آن، که قبلاً توسط سازندگان نرم‌افزار تعریف شده است، به سادگی الزامات مدل‌سازی لحاظ خواهد شد. از جمله مشکلات موجود جهت شبیه‌سازی خودروی شنی‌دار در محیط عمومی نرم‌افزار آدامز، زیادبودن تعداد قیود مفصلی و تماس بین قطعات است، به طوری که نیازمند صدها کلیک و صرف زمان قابل توجهی است. در این مقاله با وجود آنکه نیمی از خودرو به صورت دوبعدی مورد مطالعه قرار گرفته است، خودرو شامل ۱۰۲ قطعه است. مطابق شکل ۱، این قطعات شامل ۸۴ عدد کفشک شنی، یک چرخ هرزگرد<sup>۱۷</sup>، یک چرخ دندانه‌دار، ۷ عدد بازوی چرخ‌ها، ۷ عدد چرخ جاده‌ای<sup>۱۸</sup>، یک بدنه و یک زمین است. تماس بین تک‌تک قطعات شنی با زمین و چرخ‌های جاده‌ای، تعریف مفاصل بین چرخ‌ها با بازو و اتصال آن به بدنه، لحاظ نمودن نیروی اصطکاک و ضرایب مربوط به آن، تعریف نوع نیروی تماسی و تعیین ضرایب سختی و دمپر تماس در بین کلیه قطعات از آن جمله است. به عنوان نمونه صرفاً جهت تعریف تماس ۸۴ کفشک شنی با زمین حدود  $1260 = 15 \times 84$  پارامتر مختلف باید تک‌تک تعیین شود. همچنین، با این کار صرفاً برای یک نوع زمین و خودروی مشخص تماس

تعریف می‌شود و با تغییر مشخصه‌های خودرو یا زمین، لازم است دوباره صدها کلیک انجام گیرد. این مشکل زمانی که مقایسه رفتار خودرو در زمین‌ها با موانع مختلف و مشخصه‌های خودرویی گوناگون مورد نظر باشد، نمود بیشتری خواهد یافت [۱۰]. در این مقاله راه‌حل خلاقانه‌ای برای رفع این مشکل در نظر گرفته شده است. به طوری که صرفاً با نوشتن ۱۶ خط برنامه مطابق شکل ۲، تماس تک‌تک قطعات شنی با زمین و ضرایب مختلف لازم جهت تعریف تماس بین آنها مشخص شده است. سازندگان این

نرم‌افزار جهت تحلیل مسائل، هر آیکون را به مثابه چند خط دستور کد برای هسته اصلی نرم‌افزار تعریف نموده‌اند. در واقع نرم‌افزار فقط قابلیت حل این کدها را دارد و آن چیزی که به ظاهر در محیط گرافیکی مشاهده می‌شود مجموعه‌ای پیچیده از این کدهاست. از نکات منحصر به فرد در این مدلسازی، با هدف سهولت و امکان شبیه‌سازی خودروهای شنی‌دار مختلف و به کارگیری موانع مختلف، یافتن نحوه تعریف الزامات مدلسازی در نرم‌افزار آدامز به صورت کدنویسی است.

جدول ۱. نتایج حاصل از بررسی فرمت‌های مختلف در آدامز

قابلیت تشخیص خصوصیات فیزیکی مدل	امکان تعریف تماس بین قطعات	ورود همزمان کلیه قطعات متصل به هم	حجم فایل خروجی	پارامتر مورد ارزیابی
ندارد	ندارد	ندارد	زیاد	IGES(*.igs, *.iges)
ندارد	ندارد	ندارد	متوسط	STEP(*.stp, *.step)
ندارد	دارد	دارد	کم	Parasolid(*.xmt_txt,*.x_t,*.x_b)
ندارد	ندارد	ندارد	کم	SolidWorks(*.sldprt,*.sldasm)



شکل ۱. فاصله‌گذاری نقاط مهم تا مرکز جرم خودرو همراه با معرفی چرخ‌ها

### ۳. عبور خودروی شنی‌دار از گودال

به هنگام بررسی امکان‌پذیری عبور خودروی شنی‌دار از روی گودال، طول خودرو، مکان قرارگیری مرکز جرم آن،

نوع حرکت خودرو، سرعت خودرو حین عبور از مانع، مشخصات هندسی مانع، نوع زمین از نظر سفتی و نرمی، نوع خاک و نوع سیستم تعلیق خودروی شنی‌دار از جمله

عواملی هستند که در عبور از یک گودال حائز اهمیت‌اند. چنانچه فرض بر این باشد که خودروی شنی‌دار با سرعت کم از گودال عبور می‌کند، حداکثر عرض قابل عبور توسط خودروی شنی‌دار به تعادل خودرو بستگی دارد. چنانچه با عبور امتداد خط مرکز جرم خودرو از لبه گودال، سمت ابتدایی یا انتهایی خودرو به لبه دیگر گودال نرسیده باشد، خودرو سقوط خواهد کرد. به عبارت دیگر قابلیت عبور

خودرو از گودال به فاصله نقاط انتهایی تا مرکز جرم آن وابسته است. مطابق با شکل ۱، فاصله مرکز جرم خودرو تا قسمت انتهایی آن با  $R_3$  و فاصله مرکز خودرو تا قسمت جلو با  $F_3$  نشان داده می‌شود. در صورتی خودرو می‌تواند از گودال با عرض  $W$  عبور کند که  $W$  کوچکتر از  $R_3$  و  $F_3$  باشد. این اندازه‌ها برای خودروی مورد آزمایش در جدول ۲ مشخص شده است.

```

FOR variable_name=tempreal start_value=1 end_value=84
  contact create &
  contact_name = (eval("m1a1.CONTACT_//RTOI(tempreal))) &
  adams_id = (eval( unique_id("CONTACT") ))&
  &
  i_geometry_name = EXTRUSION_5145 &
  j_geometry_name = (eval("beltsys_1.belt_1.segment_//RTOI(tempreal)//".block")) &
  &
  &
  stiffness = 1.0E+005 &
  damping = 10.0 &
  exponent = 2.2 &
  dmax = 0.1 &
  coulomb_friction = on &
  mu_static = 0.3 &
  mu_dynamic = 0.8 &
  stiction_transition_velocity = 100.0 &
  friction_transition_velocity = 1000.0
END
    
```

شکل ۲. نمونه‌ای از کد نوشته شده جهت تعریف تماس تک‌تک قطعات شنی با زمین

جدول ۲. اندازه نقاط مهم تا مرکز جرم خودر (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر)

	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
اندازه	۱۰۹	۱۵۴	۱۸۲/۶۵	۹۶	۱۲۵/۸۱	۱۴۹/۵

اگر خودرو با سرعتی بالا از گودال عبور کند، این حرکت سبب افزایش نهایت عرض عبوری گودال خواهد شد. اگرچه در این حالت قابلیت عبور از پهناهای بزرگتری برای خودرو مقدور می‌باشد، اما از طرف دیگر نیروهای ضربه‌ای وارد به خودرو و سرنشینان نیز بسیار بزرگتر و بیشتر است و اثر مخربی روی قطعات خواهد داشت [۹]. با توجه به جدول اندازه‌ها و اینکه قسمت انتهایی خودرو کوتاهتر از قسمت جلوی خودرو است، طول قسمت انتهایی مبنای

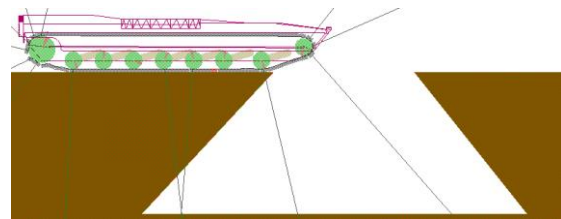
حالت بحرانی قرار می‌گیرد، که اندازه آن برابر با ۱۴۹/۵ میلی‌متر است. پیش‌بینی نهایت عرض عبوری طبق رابطه ۱ نیز برابر است با ۱۳۲/۱۴ میلی‌متر. این مقدار در مقایسه با اندازه بحرانی  $R_3$  محافظه‌کارانه است. در شکل ۳ مراحل حرکت خودرو حین عبور از گودالی با عرض ۱۵۰ میلی‌متر است (نزدیک به اندازه بحرانی  $R_3$ )، نمایش داده شده است. چنانچه مطابق شکل ۴ عرض گودال اندکی بیشتر شود (۱۶ میلی‌متر)، خودرو داخل گودال سقوط خواهد کرد.

دیگر مانع بوده است. در شکل ۶ نیروی قائم وارد بر مفصل بین چرخ چهارم (شکل ۱) با بدنه که نزدیک به مرکز جرم خودرو است، برحسب زمان برای عرض ۱۵۰ میلی‌متر نشان داده است. نقطه  $A$  نمایانگر وضعیتی است که چرخ چهارم به لبه گودال رسیده است و لذا نیرویی از جانب زمین به آن اعمال نخواهد شد. این وضعیت تا زمان رسیدن چرخ چهارم به لبه دیگر گودال یعنی نقطه  $B$  در لحظه  $0/8$  ثانیه ادامه یافته است.

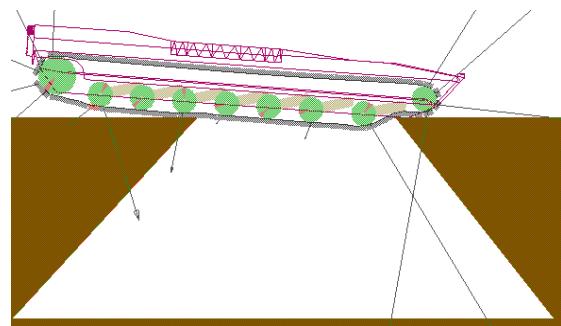
با توجه به وزن و سرعت حرکت خودرو، در این نقطه برخورد شدیدی صورت گرفته و لذا مطابق شکل ۷ در لحظه  $0/8$  ثانیه برای مدت کوتاهی بدنه خودرو دچار پرشی از سطح زمین شده است. بقیه پرش‌های مشاهده‌شده نیز ناشی از برخورد چرخ‌های دیگر خودرو با لبه گودال است که تغییر شدت آنها به دلیل تغییر فاصله آنها از مرکز جرم خودرو است. با توجه به اینکه به واسطه این نیروی زیاد، که برای چرخ چهارم در شکل ۶ نشان داده شد، ریزش و تغییر شکل لبه گودال که در تماس با شنی خودرو قرار می‌گیرد، حتی در حالت سرعت کم اجتناب‌ناپذیر است. برای احتیاط بهتر است عرض گودال با فاصله مرکز جرم خودرو تا مرکز چرخ دندانه‌دار ( $R_2$ ) و چرخ هرزگرد ( $F_2$ ) در نظر گرفته شود و هر کدام که کوچکتر باشد مبنا قرار گیرد.

#### ۴. عبور خودروی شنی‌دار از دیواره عمودی

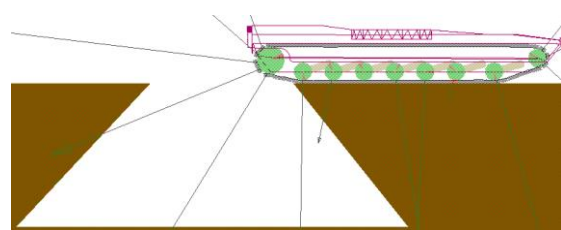
در این قسمت روشی برای استخراج ماکزیمم ارتفاعی که یک خودروی شنی‌دار بتواند از آن عبور کند ارائه شده و فرض بر این است که خودرو حداقل ضریب اصطکاک و قدرت موتور لازم برای عبور از دیوار را داشته باشد. امکان اتفاق سه رفتار متفاوت در زمانی که مرکز جرم خودروی شنی‌دار در امتداد لبه دیوار قرار گرفته است وجود دارد. در حالت اول، مرکز جرم خودرو از امتداد لبه دیوار عبور می‌کند. در حالت دوم، مرکز جرم خودرو قادر به عبور از لبه دیوار نبوده و واژگون خواهد شد و در حالت سوم، که به آن حالت بحرانی گفته می‌شود، خودرو قادر به عبور یا واژگونی



(الف)

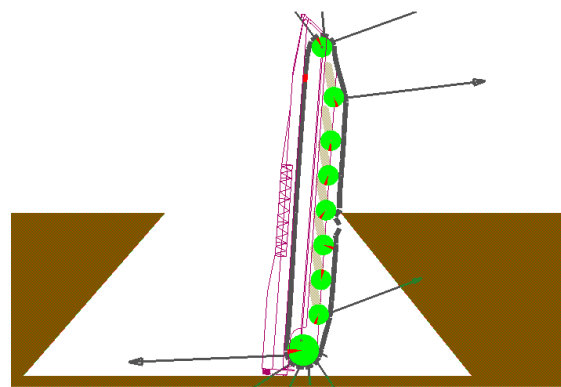


(ب)



(ج)

شکل ۳. مراحل عبور از گودال به ازای عرض ۱۵۰ میلی‌متر

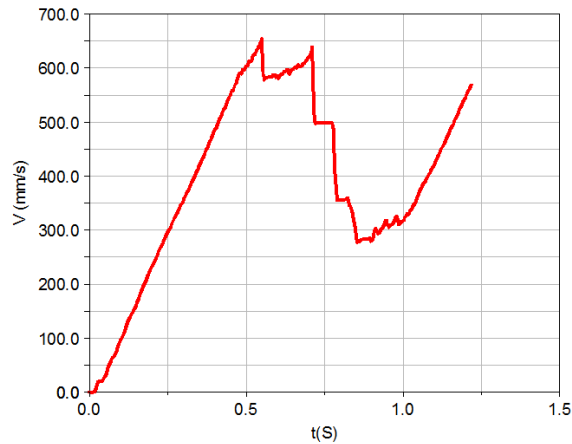


شکل ۴. سقوط خودرو داخل گودالی به عرض ۱۶۰ میلی‌متر

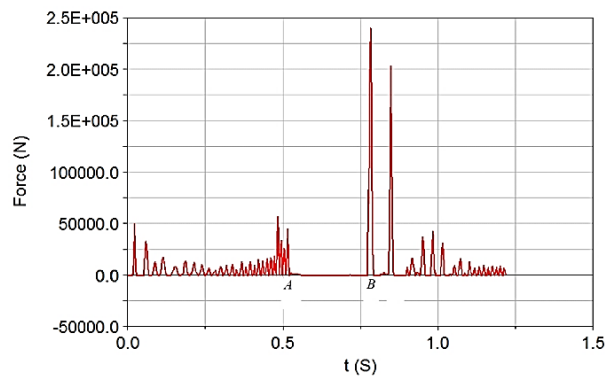
تفاوت اندک بین مقدار بحرانی حاصل از رابطه ۱ با شبیه‌سازی به واسطه سرعت افقی خودرو است که اندازه آن حین عبور از گودال در شکل ۵ مشخص شده است. این سرعت در اثر اعمال گشتاور ثابت به چرخ محرک به وجود می‌آید و افت ناگهانی اندازه آن به دلیل برخورد خودرو با لبه

حرکت این دو فاصله مقادیر متفاوتی برحسب  $\theta$  خواهند داشت. چنانچه خودروی شنی‌دار مطابق با شکل ۹ در حالت بحرانی قرار بگیرد، امتداد نیروی وزن وارد بر مرکز جرم در راستای دیوار خواهد بود. در این حالت رابطه ۲ برقرار خواهد بود.

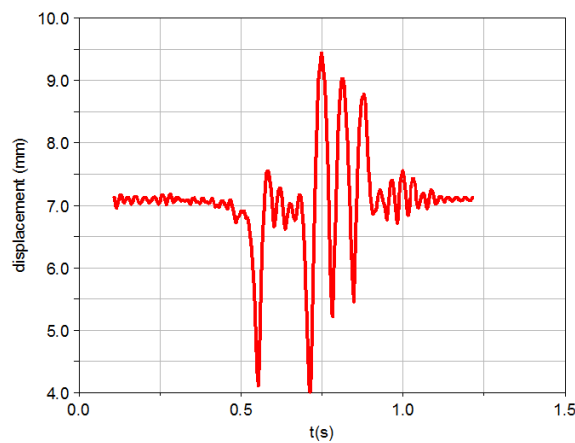
نیست و می‌توان آن را مرز بین حالت پایدار و ناپایدار در نظر گرفت. در شکل ۸،  $X_G$  و  $X_W$  هنگام قرار گرفتن خودرو در لبه مانع نمایش داده شده است. همچنین  $X_G$  فاصله افقی مرکز جرم خودروی شنی‌دار تا مرکز چرخ محرک و  $X_W$  فاصله افقی دیوار تا مرکز چرخ محرک است. در حین



شکل ۵. سرعت افقی مرکز جرم خودرو حین عبور از گودال



شکل ۶. نیروی قائم وارد بر مفصل بین چرخ چهارم با بدنه در عرض ۱۵۰ میلی‌متر



شکل ۷. تغییر مکان مرکز جرم خودرو حین عبور از گودال با عرض ۱۵۰ میلی‌متر

$$X_G = X_w \quad (2)$$

شبهه‌سازی مراحل عبور به ازای  $h=63 \text{ mm}$  (نزدیک به حالت بحرانی) در نرم‌افزار ادامز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. علاوه بر این شبهه‌سازی، مقدار ارتفاع بحرانی با استفاده از روش تحلیل گشتاور نیز محاسبه می‌شود. در شکل ۱۱ دیگرام آزاد نیروهای وارد بر خودرو زمانی که در لبه دیواره قرار گرفته است ترسیم شده است. شرط عبور خودرو از دیواره این است که گشتاور نیروهایی که در جهت پایداری و عبور خودرو از مانع حول لبه دیواره است، بیشتر از گشتاور نیروهایی که در جهت واژگونی خودرو است، باشد. به عبارت دیگر برای خودروی مورد بحث لازم است که گشتاور نیروهای پادساعتگرد  $(N_1 X_G)$  حول لبه دیوار از گشتاور نیروهای ساعتگرد  $(\mu N_1 h)$  بزرگتر باشد تا خودرو قادر باشد از دیواره عبور نماید. رابطه ۳ با توجه به همین نکته حاصل خواهد شد.

$$\sum M_c > 0 \rightarrow N_1 X_G - \mu N_1 h > 0 \quad (3)$$

در این رابطه  $\mu$  ضریب اصطکاک نقطه تماس و  $N_1$  نیروی عمودی در تکیه‌گاه پایین است. نامساوی ۳ را می‌توان به صورت رابطه ۴ نوشت.

$$h < \frac{X_G}{\mu} \quad (4)$$

از طرفی با توجه به شکل ۹ ارتفاع دیوار زمانی که مرکز جرم خودرو در راستای لبه دیوار قرار گیرد، به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$h = ((x_{G1} \cos \theta - y_{G1} \sin \theta) - (b) \tan(\frac{\theta}{2}) - \frac{l \sin(\gamma) + R_{rw}(1 - \cos(\gamma))}{\sin(\theta)} - R_{sp}(\frac{\cos(\gamma) - \cos(\theta)}{\sin(\theta)})) \tan(\theta) \quad (5)$$

بیشترین ارتفاعی که در هر دو رابطه ۴ و ۵ صدق کند، بیشترین ارتفاع دیواره است که خودروی شنی می‌تواند از آن عبور کند. با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک  $0.8$  و خصوصیات مدل هندسی مطابق با جدول ۳، مقدار ارتفاع بحرانی  $60/44$  میلی‌متر محاسبه می‌شود. البته با در نظر

گرفتن حالت دینامیکی حرکت (غیراستاتیکی) نتایج دیگری حاصل می‌شود که نیازمند بررسی بیشتر است و در این مقاله به آن پرداخته نمی‌شود.

در جدول ۴ نتایج حاصل از دو روش بررسی شده در این مقاله شامل روش تحلیل گشتاور (روابط ۴ و ۵) و روش شبهه‌سازی در نرم‌افزار ادامز بیان شده است. مشاهده می‌شود که با دقت قابل قبولی جواب‌ها به هم نزدیک‌اند. اختلاف اندک ناشی از نرم‌افزار با نتایج حاصل از روش تحلیل گشتاور می‌تواند به دلیل خطای اندازه‌گیری در نرم‌افزار و همچنین نشست اندک شنی در لبه مانع باشد.

جدول ۴. مقایسه روش‌های مختلف

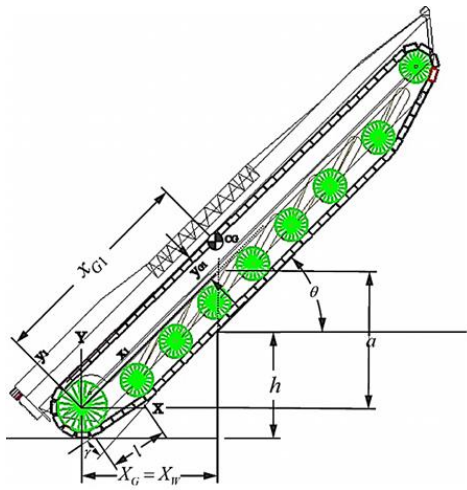
در پیش‌بینی بیشترین ارتفاع قابل عبور خودرو

نوع روش	نرم‌افزار ادامز	تحلیل گشتاور
بیشترین ارتفاع (میلی‌متر)	۶۳	۶۰/۴۴

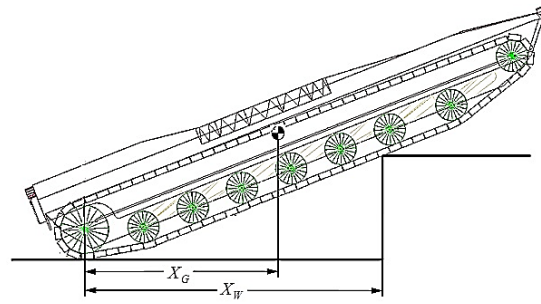
در شکل ۱۲ نمودار تغییرات بیشترین ارتفاع قابل عبور برحسب  $\theta$  برای چندین زاویه مختلف  $\gamma$  رسم شده است. زاویه  $\gamma$  از خصوصیات هندسی و پارامترهای طراحی یک خودروی شنی‌دار است و در شکل ۹ معرفی شده است. مطابق با شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش این زاویه، بیشترین ارتفاع قابل عبور به ازای یک  $\theta$  مشخص کاهش می‌یابد. از طرفی، بیشترین ارتفاع قابل عبور به ازای تمام مقادیر  $\gamma$  در یک  $\theta$  مشخص اتفاق می‌افتد.

در جدول ۵ نیز نتایج حاصل از تغییر زاویه  $\gamma$  برحسب بیشترین ارتفاع قابل عبور نمایش داده شده است. در پایان، بیشترین ارتفاع قابل عبور برحسب تغییرات مقادیر  $x_{G1}$  و  $y_{G1}$  بررسی شده است. مطابق با جدول ۶ با زیاد شدن  $x_{G1}$  بیشترین ارتفاع افزایش می‌یابد، در حالی که مطابق با جدول ۷ بیشترین ارتفاع قابل عبور با افزایش  $y_{G1}$  کاهش می‌یابد.

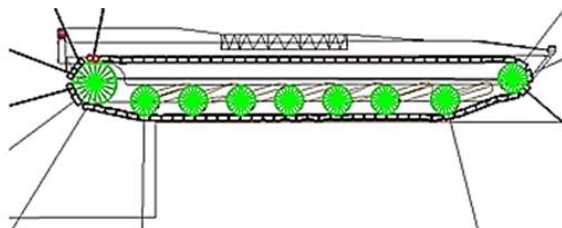
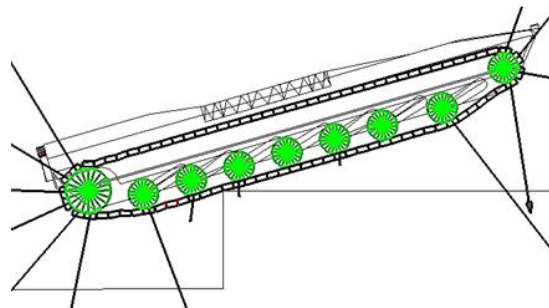
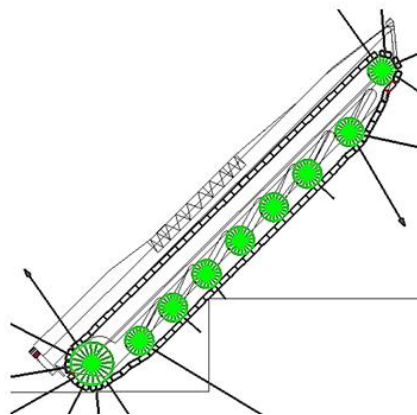




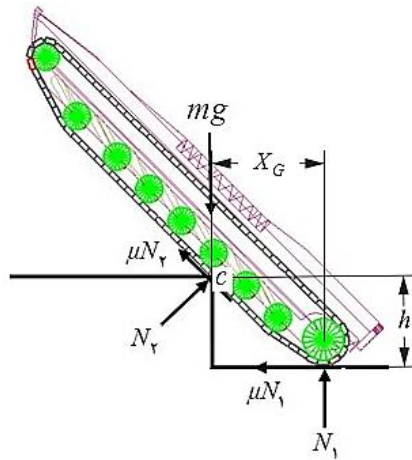
شکل ۹. نمایش خودرو در حالت بحرانی



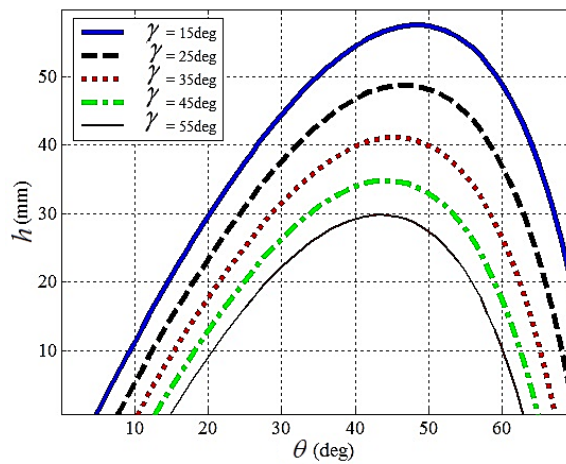
شکل ۸. هنگام قرار گرفتن خودرو در لبه دیواره عمودی



شکل ۱۰. مراحل عبور خودرو از دیوار عمودی به ازای  $h=63 \text{ mm}$



شکل ۱۱. دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر خودرو



شکل ۱۲. تغییرات ارتفاع بر حسب  $\theta$  برای چندین  $\gamma$  مختلف

جدول ۳. خصوصیات هندسی مدل

پارامتر اندازه (میلی‌متر)	$x_{G1}$	$y_{G1}$	$b$	$\gamma$	$R_{sp}$	$l$
	۱۲۵/۴۷	۱۴/۵۷	۳/۶	۱۲	۱۵	۳۸

جدول ۵. بیشترین ارتفاع عبوری در زاویه  $\gamma$

$h_{max}$ (mm)	۵۷/۵۷	۴۸/۸	۴۱/۱۷	۳۴/۸۱	۲۹/۸۲
$\gamma$ (deg)	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵

جدول ۶. تغییرات بیشترین ارتفاع قابل عبور بر حسب  $x_{G1}$  (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

$x_{G1}$	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰
$h_{max}$	۹/۲۵	۲۴/۵۴	۴۱/۷۱	۷۹/۲۸	۹۹/۰۹	۱۱۹/۴

جدول ۷. تغییرات بیشترین ارتفاع قابل عبور بر حسب  $y_{G1}$  (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

$y_{G1}$	۰	۵	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
$h_{max}$	۷۵/۴۵	۶۹/۶۷	۶۰/۰۶	۵۶/۲	۵۲/۳۴	۴۹/۰۳

## ۵. نتیجه گیری

ازای ارتفاع‌های گوناگون به کمک روش تحلیل گشتاور و روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار ادامز بررسی شد. مشاهده شد که بیشترین ارتفاع قابل عبور بر اساس هر دو روش با دقت قابل قبولی به یکدیگر نزدیک هستند. همچنین، به تحلیل تغییرات بیشترین ارتفاع قابل عبور برحسب پارامترهای مهم خودروی شنی پرداخته شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که بیشترین ارتفاع قابل عبور تا حد زیادی متأثر از پارامترهای هندسی خودروی شنی‌دار می‌باشد.

در این مقاله به منظور تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی حرکت خودروی شنی‌دار در عبور از موانع، با توجه به تعداد زیاد قطعات، قیود و تماس آنها، شیوه‌ای نوین در محیط عمومی نرم‌افزار ادامز به کار گرفته شد. در این راستا، با کدنویسی برخی قیود در محیط عمومی نرم‌افزار ادامز همراه با ارائه نکات مهم و خلاقانه مربوط به مدلسازی، از ایجاد قیود به صورت دستی جلوگیری شد. در ادامه، شرایط پایداری خودروی شنی‌دار هنگام عبور از گودال و دیوار عمودی به

## ۶. مأخذ

- [1] Shabana, A. A., *Computational Dynamics*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Adams Tracked Vehicle (ATV) Solution, <http://www.mscsoftware.com> (accessed August 30, 2016).
- [3] Yin, H. B., P. L. Shao. "Dynamic performance simulation of a tracked vehicle with ADAMS tracked vehicle toolkit software". In *Systems Modeling and Simulation: Theory and Applications*, 2005, pp. 553-558.
- [۴] مهدیان، ا. تئوری عملکرد تانک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اسناد داخلی.
- [5] Wang, Z. Y., S. J. Liu, L. Li. "Crawling Feasibility Simulation Study on Tracked vehicle for Deep Ocean Mining." *Acta Simulata Systematica Sinica*, 4, April 2004, pp. 644-646.
- [6] Rajabi, A. H., A. H. Soltanzadeh, A. Alizadeh, G. Eftekhari. "Prediction of obstacle climbing capability for tracked vehicles." *IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics*, November 2011, pp. 128-133.
- [7] Madsen, J., T. Heyn, D. Negrut. "Methods for Tracked Vehicle System Modeling and Simulation. University of Wisconsin", <http://www.sbel.wisc.edu/documents/TR-2010-01.pdf> (accessed August 30, 2016).
- [8] Matej, J. "Tracked mechanism simulation of mobile machine in MSC. ADAMS/View". *Res. Agr. Eng*, 56(1), 2010, pp. 1-7.
- [9] Zhou, Y., X. Wang. "Obstacle performance simulation of tracked vehicles based on the ADAMS/ATV". *International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, December 2011, pp. 783-786.
- [۱۰] کلاهدوزان، ع.، ابراهیمی، س.، ا. مهدیان. "شبیه‌سازی و تحلیل ارتعاشی خودروی شنی‌دار هنگام عبور از مانع با نرم‌افزار ادامز"، پنجمین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، ۱۳۹۴.
- [11] Banerjee, S., V. Balamurugan, R. Krishnakumar. "Ride dynamics mathematical model for a single station representation of tracked vehicle." *Journal of Terramechanics*, 53, 2014, pp. 47-58.

- 
1. tracked vehicles
  2. sprocket
  3. Adams
  4. Adams Car
  5. Adams Tracked Vehicle
  6. Yin
  7. Shao
  8. Wang
  9. Madsen
  10. Matej
  11. Banerjee
  12. Kuhner
  13. Solidworks
  14. export
  15. import
  16. parasolid
  17. idler
  18. road wheel