

### چکیده

مباحث مربوط به مکانیک خاکهای غیراشباع که اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته و بسیاری از مفاهیم مکانیک خاک کلاسیک را به چالش کشیده است نشان می‌دهد توصیف محیط‌های متشکل از سه فاز، نیازمند پارامترهای بیشتر و جدیدتری نسبت به محیط‌های متشکل از دو فاز آب و مواد جامد می‌باشد که سبب پیچیده‌تر شدن مفاهیم مکانیک خاک غیراشباع شده است. در این تحقیق، پاسخ لرزه‌ای آبرفتهای غیراشباع زنونز کاتولین، توف کاملاً تجزیه شده و پوسیلت با در نظر گرفتن آثار مکش بافتی به عنوان یکی از متغیرهای حالت تنش خاک غیراشباع بر مدول برشی در کرنش‌های کوچک در حالت عادی تحکیم یافته و منحنی‌های کاهش مدول برشی و نسبت میرایی  $(G/G_0-\gamma, D-\gamma)$ ، در حوزه فرکانس (به روشهای خطی معادل و خطی) با استفاده از نرم‌افزار DEEPSOIL مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق، که در قالب تابع بزرگنمایی و طیف دوجانبه شبه شتاب جابه‌جایی ارائه شده است، با بررسی پارامتریک پاسخ زمین، تأثیر مکش بافتی را بر پاسخ لرزه‌ای خاکهای غیر اشباع نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** تحلیل پاسخ لرزه‌ای زمین، مکش بافتی، خاک غیراشباع، تابع بزرگنمایی، طیف پاسخ دوجانبه

## تأثیر مکش بر پاسخ لرزه‌ای خطی و خطی معادل خاکهای غیراشباع

### فرشاد فولادی

کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه رازی کرمانشاه

### مهنوش بیگلری (نویسنده مسؤول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی

[m.biglari@razi.ac.ir](mailto:m.biglari@razi.ac.ir)

### ایمان عشایری

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی

### 1- مقدمه

مکش بافتی با ایجاد نیروی پیوندی اضافی در نقاط تماس ذرات خاک و اصلاح تنش اسکلتی خاک، رفتار خاک را بشدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این اثر گذاری می‌تواند پارامترهای دینامیکی خاک را تحت شعاع قرار دهد و در نتایج تحلیل پاسخ خاک تغییرات قابل توجهی ایجاد نماید.

در سال 2008 دأنزا و همکاران [1] اثر مکش خاک غیراشباع را به عنوان یکی از متغیرهای حالت تنش خاک غیراشباع را بر پاسخ لرزه‌ای زمین تنها با استفاده از رویکرد تحلیل خطی و اعمال اثر مکش بر سرعت موج برشی آبرفت غیراشباع بررسی نمودند. این نتایج حاکی از آن بود که با افزایش مکش، فرکانس طبیعی آبرفت غیراشباع به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش و بیشینه نسبت بزرگنمایی بشدت کاهش می‌یابد.

در سال 2013 بیگلری و عشایری [2] تحلیل خطی و خطی معادل و در سال 2014 بیگلری و همکاران [3] تحلیل‌های خطی،

اساس تحلیل یک‌بعدی پاسخ زمین در حقیقت ارائه روشی است که با استفاده از ساده‌سازی‌هایی از تفرق امواج جلوگیری شود. در این روش موج ورودی، موج برشی است که به صورت قائم به محیط وارد می‌شود. به عبارت دیگر، در این تحلیل راستای سنگ بستر به عنوان منبع تابش موج به موازات راستای لایه‌های خاک قرار دارد و بعد مسأله تنها به عمق نیمرخ خاکی محدود می‌شود و نیمرخ در ابعاد دیگر بی‌بعد فرض می‌شود؛ بنابراین، پاسخ یک نقطه روی بستر سنگی به سطح زمین منتقل می‌شود و با فرض اینکه شرایط ساختگاه در محل مورد نظر تغییری نمی‌کند، این پاسخ به نقاط دیگر ساختگاه تعمیم داده می‌شود.

خصوصیات موج لرزه‌ای به عنوان یک موج مکانیکی برخلاف امواج الکترومغناطیسی علاوه بر چشمه، به محیط انتشار موج نیز وابسته است و دقیقاً به همین دلیل می‌توان گفت که موج لرزه‌ای از زمان انتشار در چشمه موج تا زمان اعمال به سازه در ماهیت خود تغییرات زیادی می‌کند.

برشی و نسبت میرایی خاک غیراشباع بر اساس مطالعات آزمایشگاهی اخیر ارائه شده توسط بیگلری و همکاران [4 و 10] در خصوص اندازه‌گیری مدول برشی و نسبت میرایی ارائه کردند. این مدل، با اصلاح مدل ایشی باشی و ژانگ [11] وابستگی مدول برشی و نسبت میرایی به مکش بافتی، دامنه کرنش برشی، تنش اسکلتی متوسط، متغیر پیوندی، نسبت تخلخل و درجه اشباع را در نظر می‌گیرد.

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات در دسترس در خصوص ویژگیهای فیزیکی نمونه‌های خاکی در دسترس (جدول 1)، مدول برشی در کرنش‌های کوچک و منحنی‌های کاهش مدول برشی و نسبت میرایی بر اساس مدل‌های بیگلری و همکاران [8] و بیگلری و عشایری [2 و 9] در کرنش‌های کوچک و بزرگ به دست آمده است.

جدول (1): ویژگیهای فیزیکی نمونه‌های خاکی

پوسیلت	توف	زنوز کائولین	پارامترها
2/74	2/73	2/65	چگالی ویژه ( $G_s$ )
51	43	29	حد روانی (LL)
33	29	17	حد پلاستیک (PL)
18	14	12	شاخص خمیری (PI)
ML/MH	ML	CL	طبقه بندی (USCS)

تغییرات درجه اشباع در مکش‌ها و تنش‌های خالص متوسط مختلف برای نمونه‌های زنوز کائولین و پوسیلت در اشکال (1 و 2) نشان داده شده است. شایان ذکر است که درجه اشباع نمونه توف از منحنی نگهداشت آب به دست آمده است و با تغییرات تنش خالص متوسط تغییر نمی‌کند. مقادیر درجه اشباع در نمونه توف برای مکش‌های صفر (اشباع)، 50، 100 و 200 کیلو پاسکال به ترتیب برابر با 1، 0/92، 0/77 و 0/65 است [7].

مشخصات نیمرخهای خاکی مختلف شامل تنش خالص متوسط، سرعت موج برشی و وزن واحد حجم در لایه‌های مختلف و در ترازهای مکش متنوع در جداول (2 تا 4) آورده شده است. در این جداول چهار نیمرخ خاکی زنوز کائولین در ترازهای مکش صفر (اشباع)، 50، 150 و 300 کیلو پاسکال، چهار نیمرخ خاکی توف در ترازهای مکش صفر (اشباع)، 50، 100 و 200 کیلو پاسکال و سه نیمرخ خاکی پوسیلت در ترازهای مکش 100، 200 و 400 کیلو پاسکال آورده شده است.

خطی معادل و غیر خطی بر پاسخ آبرفتی غیراشباع را با لحاظ کردن اثر مکش بر منحنی‌های  $G/G_0$  و  $D-\gamma$  بررسی کردند که نشان می‌داد افزایش مکش به افزایش اولین فرکانس طبیعی منجر می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از آن است که پاسخ سازه‌هایی که بر روی نیمرخهای خاکی غیراشباع قرار گرفته‌اند، بویژه در فرکانس‌های بالاتر، شدیدتر از خاک اشباع است.

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار "DEEPSOIL" پاسخ لرزه‌ای سه نوع خاک غیراشباع زنوز کائولین، پوسیلت و توف که به ترتیب در سال 2011 توسط بیگلری و همکاران [4]، واسالو و همکاران [5] و در سال 2008 ان‌جی و یانگ [6] گزارش شده است، در ترازهای مکش متنوع، به روشهای مختلف تحلیل یک‌بعدی (خطی و خطی معادل) ارزیابی و پارامترهای مختلف جنبش زمین با تغییرات مکش بررسی شده است.

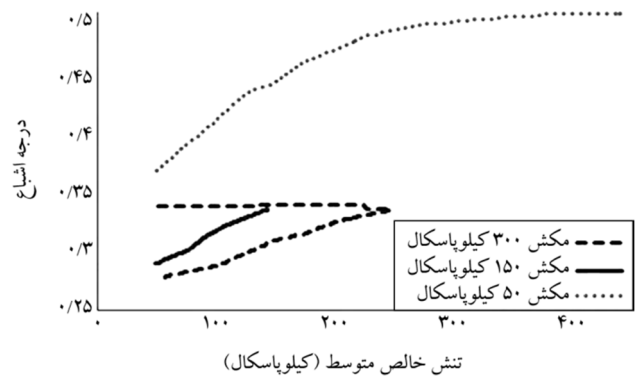
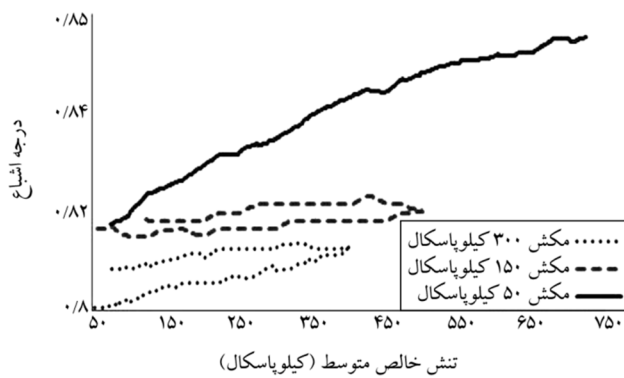
## 2- تعریف پارامترهای ورودی مورد نیاز برای تحلیل پاسخ ساختگاه

به منظور به دست آوردن پاسخ دینامیکی آبرفت خاکی، عمق، مدول برشی، نسبت میرایی و وزن واحد حجم لایه‌های مختلف یک نیمرخ مورد نیاز است. علاوه بر این، برای ارزیابی پاسخ خاک نیز با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی آن، منحنی‌های کاهش مدول برشی، میرایی ( $D-\gamma$  و  $G/G_0$ ) مورد نیاز می‌باشد.

در سال 2014 ونگ و همکاران [7] با استخراج پارامترهای برخی از مدل‌های غیراشباع برآورد مدول برشی در کرنش‌های کوچک از جمله مدل بیگلری و همکاران [8] برای نمونه‌های خاکی زنوز کائولین، توف کاملاً تجزیه شده و پوسیلت نشان دادند که مدل پیشنهادی اخیر آنها و مدل بیگلری و همکاران تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارد و برآورد منطقی‌تری را ارائه می‌دهند.

ارائه پارامترهای مدل بیگلری و همکاران [8] برای دو نمونه خاکی پوسیلت و توف، علاوه بر زنوز کائولین، که پیش از این نیز موجود بود، این امکان را فراهم ساخت تا مدول برشی نمونه‌های خاکی پوسیلت و توف نیز در ترازهای تنش و مکش متغیر برآورد شود و در دسترس قرار گیرد.

در سال 2012 بیگلری و عشایری [9] مدلی برای تخمین مدول



شکل (2): تغییرات درجه اشباع با مکش و تنش خالص برای پوسبیلت

شکل (1): تغییرات درجه اشباع با مکش و تنش خالص برای زنوز کائولین

جدول (2): سرعت موج برشی و وزن واحد حجم نیمرخهای ساخته شده از زنوز کائولین

مکش = 300 کیلو پاسکال		مکش = 150 کیلو پاسکال		مکش = 50 کیلو پاسکال		مکش = صفر		لایه ها
$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	
176/00	13/50	159/00	13/70	138/00	14/50	115/00	19/30	1
185/00	13/80	170/00	14/20	162/00	15/10	130/00	19/38	2
203/00	14/30	188/00	14/60	181/00	15/67	142/00	19/57	3
219/00	14/50	213/00	15/10	201/00	16/19	154/00	19/61	4
194/37	14/03	180/30	14/40	167/23	15/39	133/67	19/47	میانگین

جدول (3): سرعت موج برشی و وزن واحد حجم نیمرخهای ساخته شده از پوسبیلت

مکش = 400 کیلو پاسکال		مکش = 200 کیلو پاسکال		مکش = 100 کیلو پاسکال		لایه ها
$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	
303/00	18/98	255/00	18/89	230/00	18/68	1
305/00	19/00	260/00	18/89	235/00	18/70	2
308/00	19/03	268/00	18/92	243/00	18/76	3
313/00	19/06	275/00	18/96	250/00	18/82	4
307/20	19/02	264/28	18/92	239/26	18/74	میانگین

جدول (4): سرعت موج برشی و وزن واحد حجم نیمرخهای ساخته شده از توف

مکش = 200 کیلو پاسکال		مکش = 100 کیلو پاسکال		مکش = 50 کیلو پاسکال		مکش = صفر		لایه ها
$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	
311/00	19/30	284/00	19/80	256/00	20/17	237/00	20/76	1
352/00	19/34	299/00	19/85	272/00	20/23	250/00	20/87	2
334/00	19/38	308/00	19/89	282/00	20/27	269/00	20/94	3
348/00	19/43	323/00	19/95	297/00	20/34	287/00	21/05	4
328/95	19/36	302/84	19/87	275/94	20/25	261/23	20/91	میانگین

مکش ثابت و تنش خالص متوسط مختلف روی بستر سنگی کشسان اعمال شده است.

در این تحقیق، شش شتابنگاشت (تراز شده به شتاب حداکثر 0/1 g) مطابق جدول (5)، به نیمرخهای 24 متری با لایه بندی یکسان،

**جدول (5): جزئیات مربوط به حرکات ورودی**

شماره	نام زلزله	تاریخ وقوع	ایستگاه	بزرگای زلزله ( $M_b$ )
1	کیپ مندوسینو	1992/25/04	89005 Cape Mendocino	7/1
2	چی چی	1999/20/09	ALS	7/6
3	کوبه	1995/16/01	KJMA	6/9
4	لوماپریتا	1989/18/10	47379 Gilroy Array #1	6/9
5	نورتریج	1994/17/01	24207 Pacoima Dam (upper left)	6/7
6	طیس	1978/16/09	9101 Tabas	7/4

### 3- ارزیابی تحلیل پاسخ زمین

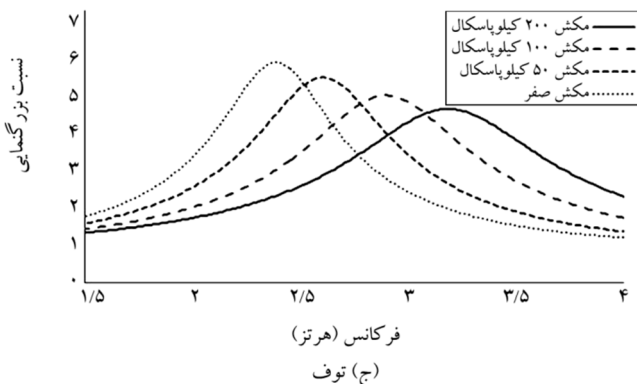
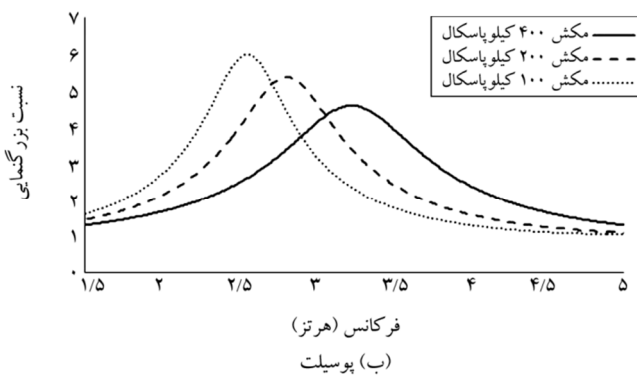
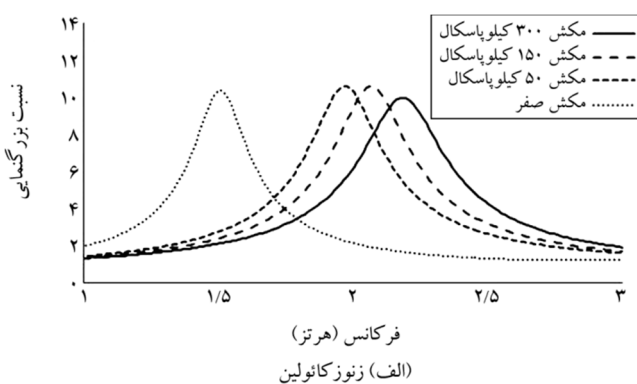
در مهندسی ژئوتکنیک آبرفت خاکی در اغلب شرایط، بسته به تراز آب زیرزمینی و شرایط آب و هوایی منطقه غیراشباع است و مکش بافتی به عنوان یکی از متغیرهای حالت تنش خاک غیراشباع، پارامترهای دینامیکی و رفتار غیرخطی خاک را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین ارائه پاسخ لرزه‌ای آبرفتهای غیراشباع با در نظر گرفتن آثار مکش بر پارامترهای ورودی تحلیل دینامیکی می‌تواند نتایج منطقی‌تری را ارائه نماید. در این مقاله، طیف دو جانبه شبه شتاب - جابه‌جایی و تابع بزرگنمایی در ترازهای مختلف مکش در حوزه فرکانس مقایسه شده است.

### 4- تابع نسبت بزرگنمایی

نسبت بزرگنمایی، معرف نسبت دامنه شتاب در سطح زمین به دامنه شتاب حرکت ورودی در فرکانس متناظر آن است. این نسبت در تحلیل خطی به حرکت ورودی وابسته نیست و بزرگنمایی یا کوچک - نمایی آن تنها به نسبت میرایی و امیدانس محیط بستگی دارد و اساساً آثار محیط انتشار موج را بر حرکت ورودی نشان می‌دهد.

در تحلیل خطی بدون در نظر گرفتن میرایی تنها امیدانس (حاصل ضرب چگالی و سرعت انتشار موج برشی) است که نسبت بزرگنمایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به طوری که با افزایش امیدانس محیط، بیشینه نسبت بزرگنمایی کاهش می‌یابد [12]. در محیط ویسکوالاستیک خطی، زمانی که مکش خاک افزایش می‌یابد، بیشینه نسبت بزرگنمایی کاهش می‌یابد (شکل 3)؛ زیرا تراز مکش، امیدانس خاک را با تغییرات سرعت موج برشی تحت تأثیر قرار می‌دهد. البته شایان ذکر است، در شرایطی که تخلخل در حرکت از حالت اشباع به غیراشباع شدیداً افزایش یابد، نسبت بزرگنمایی علی‌رغم افزایش

مکش می‌تواند دچار بزرگنمایی شود (شکل 3 و جدول 6)، تغییرات امیدانس پروفیل زونز کاتولین از مکش صفر به 50 کیلو پاسکال). همچنین در این خصوص می‌توان گفت، با افزایش مکش، میزان سرعت موج برشی آبرفت خاکی افزایش یافته که در نتیجه آن فرکانس طبیعی نیمرخ خاکی ( $V_s / 4h$ ) افزایش می‌یابد. این امر بدان معناست که در تحلیل خطی، افزایش مکش، هم باعث کاهش میزان تشدید می‌شود و هم فرکانس طبیعی خاک را به فرکانس‌های بالاتری منتقل می‌کند (در این رابطه  $h$  عمق پروفیل و  $V_s$  سرعت موج برشی می‌باشد). نتایج ذکر شده اگرچه در حالت بدون میرایی است، اما با نتایج ارائه شده توسط دانزا و همکاران [1]،


**شکل (3): تابع بزرگنمایی خطی در تغییرات مکش**

وابستگی کامل فرکانس طبیعی به سرعت موج برشی است (جدول 7). این نتایج همچنین با نتایج ارائه شده توسط بیگری و عشایری [2] که نیمرخهای خاکی غیراشباع زنونز کائولین را در ترازهای مکش مختلف با استفاده از نرم افزار EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses) مورد ارزیابی قرار دادند، کاملاً در تطابق است. همچنین نتایج تحلیل خطی معادل نشان می دهد که الزاماً بیشترین تشدید در اولین فرکانس طبیعی رخ می دهد و این امر به صورت یک رخداد حتمی در تمامی حالات قابل مشاهده است. بیشینه نسبت بزرگنمایی برای نیمرخهای ساخته شده از زنونز کائولین همواره با افزایش مکش افزایش، ولی برای نیمرخهای ساخته شده از پوسیت و توف همواره با افزایش مکش کاهش می یابد.

علت این امر را می توان چنین توجیه کرد که رفتار تنش-کرنش نیمرخهای پوسیت و توف به دلیل بالا بودن شاخص خمیری و کم بودن نسبت تخلخل آنها، در سطوح پایین کرنش باقی می ماند (عموماً کمتر از 0/01 درصد)؛ بنابراین می توان گفت که در این سطوح کرنش رفتار این خاکها از نظر نسبت بزرگنمایی به دست آمده نتایجی مشابه با تحلیل خطی را نشان می دهد. رفتار تنش-کرنش نیمرخهای خاکی در ترازهای مکش مختلف در تحلیل خطی معادل برای زلزله کبک مندوسینو در شکل (4) نشان داده شده است.

**جدول (6): امیدانس متوسط در ترازهای مکش مختلف در تحلیل خطی**

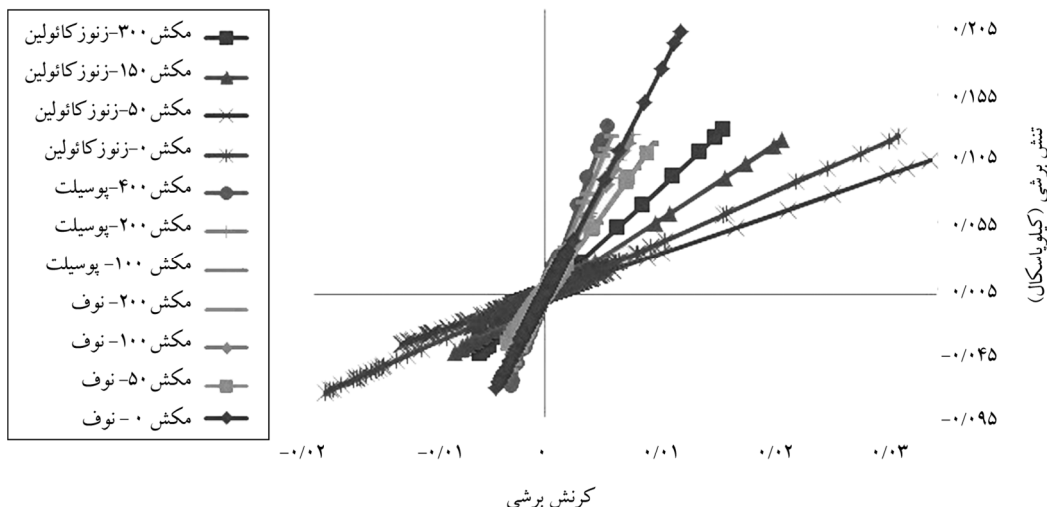
زنوز کائولین		توف		پوسیت	
مکش (کیلو پاسکال)	امیدانس	مکش (کیلو پاسکال)	امیدانس	مکش (کیلو پاسکال)	امیدانس
0	264/7	0	556/4	100	457/0
50	262/6	50	568/4	200	510/1
150	265/0	100	614/8	400	596/0
300	277/9	200	648/0		

که مجموعه ای از تحلیل های خطی را با در نظر گرفتن آثار مکش بر تابع انتقال (تابع بزرگنمایی) مورد بررسی قرار دادند، انطباق دارد. در تحلیل خطی معادل، رفتار غیرخطی هیستریک تنش-کرنش خاکهای بارگذاری شده به صورت تناوبی را می توان با در نظر گرفتن خواص معادل خطی خاک به نحوی که در آن رفتار واقعی غیرخطی خاک با استفاده از یک رویکرد تکراری تخمین زده شود، تعیین نمود [12].

در این بخش نتایج تحلیل خطی معادل نیمرخهای خاکی غیراشباع زنونز کائولین، توف و پوسیت در قالب اولین فرکانس طبیعی و اولین اوج تابع بزرگنمایی ارائه شده است (جدول 7). نتایج تحلیل خطی معادل نیمرخهای خاکی در مکش های مختلف با لحاظ کردن آثار مکش در منحنی های نسبت مدول برشی، نسبت میرایی و مدول برشی نشان می دهد، اولین فرکانس طبیعی (فرکانس متناظر با اولین اوج تابع بزرگنمایی) با افزایش مکش همواره افزایش می یابد که نشان دهنده

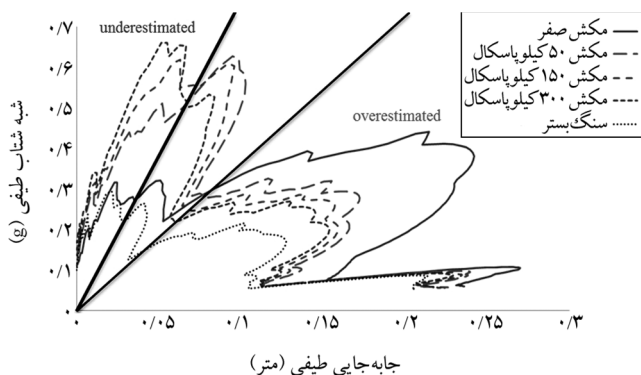
**جدول (7): اولین فرکانس طبیعی و اولین بیشینه بزرگنمایی در تحلیل خطی معادل برای نیمرخهای ساخته شده از زنونز کائولین، پوسیت و توف**

زنوز کائولین در تحلیل خطی معادل												
طیس		نرتریج		لوماپرتنا		کوبه		چی چی		کبک مندوسینو		مکش بافتی
1/68	2/82	1/77	2/97	1/62	2/74	1/58	2/69	1/59	2/69	1/77	2/98	300 کیلو پاسکال
1/48	2/73	1/57	2/86	1/40	2/64	1/35	2/59	1/39	2/62	1/57	2/88	150 کیلو پاسکال
1/28	2/65	1/39	2/75	1/21	2/58	1/15	2/54	1/20	2/56	1/38	2/76	50 کیلو پاسکال
0/89	2/50	1/04	2/67	0/85	2/50	0/84	2/48	0/76	2/40	0/96	2/57	صفر (اشباع)
توف کاملاً تجزیه شده در تحلیل خطی معادل												
2/31	2/23	2/42	2/28	2/26	2/21	2/23	2/20	2/28	2/20	2/38	2/27	200 کیلو پاسکال
2/06	2/27	2/16	2/32	1/99	2/24	1/95	2/22	1/96	2/22	2/14	2/32	100 کیلو پاسکال
1/81	2/32	1/90	2/37	1/75	2/28	1/69	2/26	1/69	2/25	1/89	2/37	50 کیلو پاسکال
1/60	2/34	1/71	2/41	1/53	2/30	1/48	2/27	1/49	2/28	1/71	2/42	صفر
پوسیت در تحلیل خطی معادل												
2/48	2/36	2/58	2/40	2/44	2/33	2/45	2/34	2/45	2/34	2/54	2/39	400 کیلو پاسکال
2/10	2/47	2/17	2/52	2/04	2/43	2/00	2/41	2/02	2/42	2/16	2/52	200 کیلو پاسکال
1/86	2/53	1/93	2/59	1/79	2/49	1/75	2/46	1/75	2/46	1/93	2/59	100 کیلو پاسکال



شکل (4): رفتار تنش- کرنش نمونه‌های خاکی در زلزله کبک مندویسنو در تحلیل خطی معادل

پریودهای کوتاه، برش پایه محاسبه شده برای طرح لرزه‌ای سازه‌ها کمتر از مقدار واقعی است و سازه‌های ساخته شده بر این مبنا مقاومت کافی را در برابر نیروی جانبی زلزله نخواهند داشت.



شکل (5): طیف دوجانبه زنونز کائولین در تحلیل خطی معادل برای زلزله چی چی

برای واضح تر نشان دادن آثار مکش بر طیف پاسخ در محدوده پریودهای کوتاه از پارامتری تحت عنوان شدت شتاب طیفی (ASI) استفاده شده است. شدت شتاب طیفی، انتگرال منحنی شبه شتاب در بازه پریودی 0/1 تا 0/5 ثانیه است (رابطه 2) که عموماً برای بیان معیار شدت حرکت زمین برای پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی در دو دهه گذشته به کار گرفته شده است. این پارامتر می‌تواند معیار شدت مطلوبی برای استفاده در تعریف عملکرد لرزه‌ای باشد؛ زیرا شدت حرکت زمین برای سازه‌های کوتاه پریود را نشان می‌دهد [13]:

$$ASI = \int_{0.1}^{0.5} Sa(T, 5\%) dT \quad (2)$$

## 5- طیف پاسخ دوجانبه شبه شتاب - جابه‌جایی

نمودار طیف پاسخ دوجانبه شبه شتاب - جابه‌جایی یکی از شیوه‌های نمایش منحنی‌های طیفی است که در سالهای اخیر مطرح شده و کاربرد ویژه‌ای در آیین‌نامه‌های زلزله پیدا کرده است. طیف پاسخ جابه‌جایی و شبه شتاب به ترتیب بیان‌کننده بیشینه جابه‌جایی و بیشینه مقدار برش پایه و یا نیروی استاتیکی معادل برای سیستم یک درجه آزادی با میرایی مشخص است؛ بنابراین هدف از ترسیم این منحنی طیفی، نمایش اطلاعات شبه شتاب و جابه‌جایی در یک منحنی و گریز از پیچیدگی‌های رسم منحنی طیف پاسخ سه‌جانبه است.

رابطه (1) معادله حاکم بر این منحنی طیفی است و با توجه به این رابطه، در این نمودار مکان هندسی نقاطی که پریود ثابت دارند یک خط است؛ به طوری که تانژانت این خط مجذور فرکانس و کتانژانت آن مجذور پریود است:

$$T^2 = S_D / S \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $T$  پریود،  $S_D$  جابه‌جایی طیفی و  $S_a$  شبه شتاب طیفی می‌باشد.

طیف دوجانبه پروفیل‌های ساخته شده از زنونز کائولین، پوسیلت و توف در تحلیل خطی معادل برای چی چی در شکل (5) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش میزان مکش در پریودهای کوتاه، شبه‌شتاب افزایش و در پریودهای بلند جابه‌جایی کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد، در صورت عدم لحاظ آثار واقعی خاک غیراشباع نسبت به خاک اشباع در محدوده

که قادر است پاسخ دینامیکی خاک را در روشهای حوزه فرکانس (تحلیل‌های خطی و خطی معادل) برآورد نماید مورد ارزیابی گرفته است.

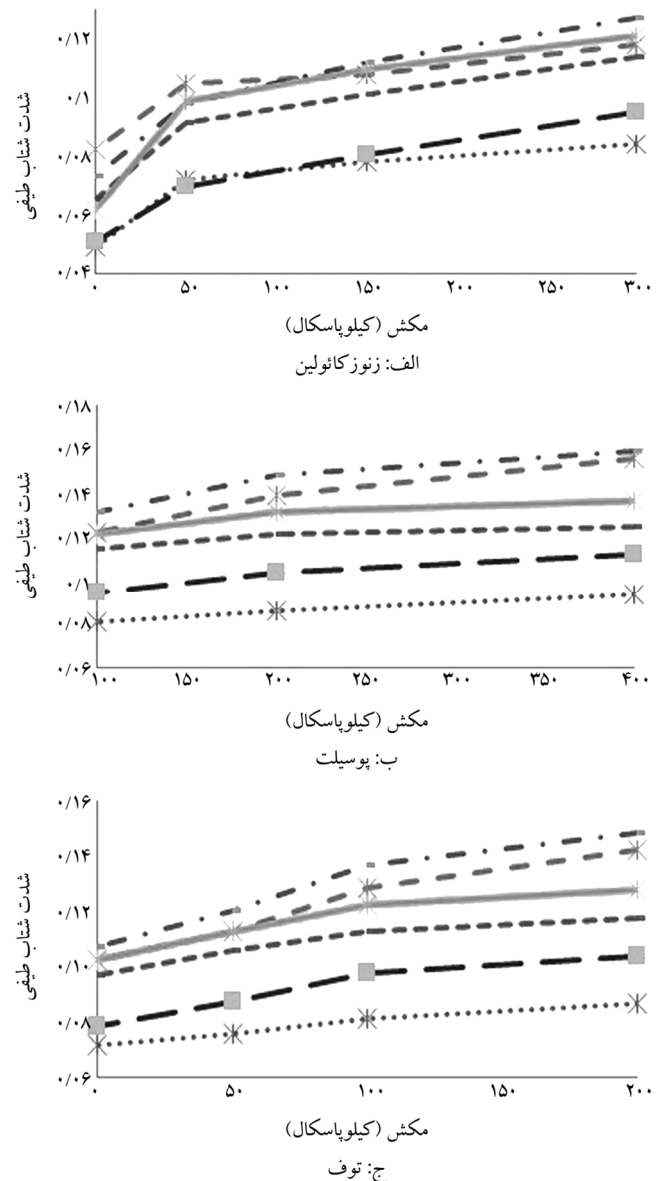
تحلیل یک بعدی پاسخ نیمرخهای مختلف، با استفاده از شش شتابنگاشت به روشهای تحلیل مختلف انجام و آثار مکش بافتی به عنوان یکی از متغیرهای حالت تنش خاک غیراشباع بر پارامترهای جنبش نیرومند زمین بررسی شده است.

رفتار تنش- کرنش نمونه‌های حاکی مختلف (زنوز کائولین، پوسیت و توف) نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی خاکها علاوه بر مکش شدیداً تحت تأثیر شاخص خمیری، نسبت تخلخل و تنش خالص متوسط، به عنوان پارامترهای مهم در تعیین رفتار غیرخطی خاکهاست؛ به طوری که در نمونه‌های حاکی با رفتار غیرخطی تر (مانند زنوز کائولین)، تغییرات مکش همواره نسبت مستقیمی با بیشینه نسبت بزرگنمایی دارد. بیشینه نسبت بزرگنمایی در واقع اولین بزرگنمایی رخ داده است که در کوتاهترین فرکانس ممکن روی می‌دهد و فرکانس متناظر با آن، اولین فرکانس طبیعی نامیده می‌شود. نتایج تحلیل‌های خطی و خطی معادل حاکی از آن است که اولین فرکانس طبیعی در تمامی نیمرخهای حاکی با افزایش مکش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج ارائه شده در خصوص طیف پاسخ دوجانبه شبه شتاب- جابه‌جایی نشان می‌دهد که در پریودهای کوتاه با افزایش مکش همواره شبه شتاب طیفی افزایش و در پریودهای بلند با افزایش مکش از میزان جابه‌جایی کاسته می‌شود.

#### 7- مراجع

1. D'Onza, F., D'Onofrio, A., and Mancuso, C. (2008). Effects of unsaturated soil state on the local seismic response of soil deposits. *Proc. of the 1st European Conf. on Unsaturated Soils* (pp. 531-536). Durham, UK.
2. Biglari, M. and Ashayeri, I. (2013). Seismic ground response analysis of unsaturated soil deposits. *International Journal of Civil Engineering*, 11(2), p. 150-155.
3. Biglari, M., Ashayeri, I., and Fouladi, F. (2014). Nonlinear ground response analysis of unsaturated soil deposits. *Proc. of the 6th International conference on*

در این رابطه،  $T$  پریود و  $S_a$  شبه شتاب طیفی است. شدت شتاب طیفی در ترازهای مختلف مکش برای نمونه‌های حاکی زنوز، توف و پوسیت در تحلیل خطی معادل در شکل (6) نشان داده شده است که به روشنی حاکی از رابطه مستقیم آثار مکش بر شتاب طیفی در پریودهای کوتاه می‌باشد.



شکل (6): تغییرات شدت شتاب طیفی با تغییرات مکش در تحلیل خطی معادل برای هم حرکات ورودی

#### 6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پاسخ لرزه‌ای نیمرخهای اشباع و غیراشباع در مکش‌ها و درجات اشباع متغیر با استفاده از نرم‌افزار DEEPSOIL

- unsaturated soils* (pp. 389-396). Sydney, Australia: CRC Press.
4. Biglari, M., Jafari, MK., Shafiee, A., Mancuso, C., d'Onofrio, A. (2011). Dynamic properties of unsaturated kaolin measured in a wide strain range with new suction controlled cyclic triaxial device. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 34(5), p 1-12.
  5. Vassallo, R., Mancuso, C., and Vinale, F. (2007). Effects of net stress and suction history on the small strain stiffness of a compacted clayey silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(4), p. 447-462.
  6. Ng, C.W.W. and Yung, SY. (2008). Determination of the anisotropic shear stiffness of an unsaturated decomposed soil. *Géotechnique*, 58(1), p. 23-35.
  7. Wong, K.S., Mašín, D., and Ng, C.W.W. (2014). Modelling of shear stiffness of unsaturated fine grained soils at very small strains. *Computers and Geotechnics*, 56, p. 28-39.
  8. Biglari, M., Mancuso, C., d'Onofrio, A., Jafari, MK., Shafiee, A. (2011). Modelling the initial shear stiffness of unsaturated soils as a function of the coupled effects of the void ratio and the degree of saturation. *Computers and Geotechnics*, 38(5), p. 709-720.
  9. Biglari, M., and Ashayeri, I. (2012). An empirical model for shear modulus and damping ratio of unsaturated soils. (Eds. D. G. Toll, C. E. Augarde, D. Gallipoli, S. J. Wheeler ). *Proc. 5th Asia- Pacific conf. on unsaturated soils* (p. 591-596). Pataya, Thailand: CRC Press.
  10. Biglari, M., d'Onofrio, A., Mancuso, C., Jafari, MK. (2012). Small-strain stiffness of Zenoz kaolin in unsaturated conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(3), p. 311-322.
  11. Ishibashi, I. and Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sands and clays. *Soil and Foundations JSSMFE*, 33(1), p. 182-191.
  12. Kramer, SL. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
  13. Bradley, BA. (2010). Site-specific and spatially distributed ground-motion prediction of acceleration spectrum intensity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(2), p. 792-801.





## Effects of Matric Suction on the Linear and Equivalent Linear Seismic Response of Unsaturated Soils

**Farshad Fouladi**

M.S. Graduate, Department of Civil Engineering, Razi University,  
Daneshgah Blvd., Kermanshah, Iran.

**Mehrnoosh Biglari**

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi  
University, Daneshgah Blvd., Kermanshah, Iran.  
(Corresponding Author). Email: [m.biglari@razi.ac.ir](mailto:m.biglari@razi.ac.ir)

**Iman Ashayeri**

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi  
University, Daneshgah Blvd., Kermanshah, Iran.

Newly emerged fields of unsaturated soil mechanics that are addressed more recently and have challenged the classical concepts of saturated soil mechanics, reveals that description of three phase media needs new and more parameters than two phase saturated soil mechanics. This has made it more complex. In the current research, seismic response of three unsaturated soil deposits are studied by considering effects of matric suction as a state parameter on shear modulus as well as damping ratio and shear modulus degradation using frequency domain analyses with DEEPSOIL software. The results are presented in terms of amplification function and spectral acceleration-displacement to investigate the effects of matric suction on seismic response of unsaturated soil deposits.

**Keywords:** Seismic Site Response Analysis, Matric Suction, Unsaturated Soils, Amplification Function, Spectral Acceleration-Displacement