

PHN10110321181

بررسی اثر پارامترهای سطوح مشترک بر رفتار دیوارهای
حایل سنگ چین با استفاده از روش اجزا منفصل

سید بهالدین مؤیدی، سید محمد بینش

1- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی دانشگاه صنعتی شیراز

2- استادیار دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز

B.Moayedi@sutech.ac.ir

خلاصه

یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک، کنترل پایداری دیوارهای حائل می باشد. دیوارهای حائل وزنی معمولاً در طراحی ها به صورت صلب در نظر گرفته می شوند، در حالی که رفتار واقعی آنها تابع تغییر شکل است. از آنجایی که دیوار حائل سنگچین از بلوک های مجزا تشکیل شده است، مدل سازی آن به روش اجزاء منفصل (DEM) منطقی تر به نظر می رسد. در این مقاله یک دیوار حائل وزنی با بلوک های سنگی آن با نرم افزار UDEC مدل شده است. و رفتار واقعی دیوار حائل سنگی با توجه به روش اجزاء منفصل مورد ارزیابی قرار گرفته و اثر مشخصات سطح مشترک خاک و دیوار و خاک و پی بر رفتار دیوارهای سنگچین بررسی شده است.

کلمات کلیدی: دیوارحائل سنگچین، المان مجزا، سطح مشترک، نرم افزار UDEC

1. مقدمه

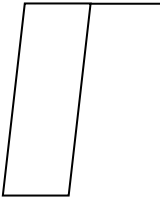
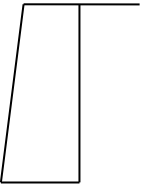
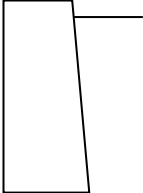
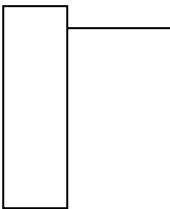
دیوارهای حایل سنگچین یک شکل قدیمی و گسترده دیوارهای حایل است که خصوصاً در راههای کوهستانی یافت می شود. دیوارهای حایل سنگچینی با مصالح محلی ساخته می شوند و معمولاً از بلوک های سنگی با اندازه های مختلف بدون استفاده از ملات تشکیل شده اند. سطح بلوکهای سنگی زبر است. تحلیل کلاسیک دیوارهای حایل خشکه چینی محدود به بررسی پایداری در برابر واژگونی و لغزش و ظرفیت باربری می شود. در واقع این دیوارها به صورت دیوار حایل وزنی صلب در نظر گرفته می شوند حال آنکه دیوارهای سنگ چین عموماً از قرارگیری بلوکهای سنگی بر یکدیگر تشکیل می شوند و در نظر گرفتن آن به صورت یک محیط پیوسته دور از واقعیت می باشد. روش اجزاء منفصل در سال 1971 توسط [1] Cundall معرفی شد. این روش در ابتدا برای تحلیل توده سنگهای درزه دار و شبیه سازی جابجایی های پیش رونده بلوکهای سنگی به وجود آمد و به تدریج دامنه کاربرد آن به مصالح دانه ای و سایر مصالح نیز گسترش یافت. روش اجزای منفصل یک روش عددی برای توصیف رفتار محیط های ناپیوسته است که در آن برخوردهای اجزا و تبادل نیرو بین آنها ردیابی می شود و در گام های زمانی متوالی نیروهای بین بلوکهای محاسبه شده و سرعت و تغییر مکان بلوکها در انتهای گام زمانی مورد نظر به دست می آید که این روند تا رسیدن به تعادل ادامه می یابد.

برای مدلسازی دیوار حایل سنگچین از نرم افزار UDEC استفاده شده است. UDEC یک برنامه اجزای منفصل دویعدی است که بر اساس محاسبات لاگرانژین کار می کند و می تواند تغییر شکل های بزرگ را به خوبی شبیه سازی کند. در این برنامه هر یک از اجزاء منفصل، خود می توانند صلب یا تغییرشکل پذیر باشند که بلوکهای تغییرشکل پذیر با استفاده از مش بندی های تفاضل محدود تحلیل می شوند. در سال های اخیر بررسی رفتار دیوارهای حایل سنگچین با استفاده از روش اجزاء منفصل و به کمک نرم افزار UDEC مورد توجه قرار گرفته است زیرا در این نوع دیوارها رفتار علاوه بر مشخصات بلوکهای سنگی به مشخصات درزه ها نیز وابسته است.

در سال 1834، چهار دیوار سنگ چین توسط [2] Burgoyne ساخته شد. هر دیوار 6.1 متر طول و 6.1 متر ارتفاع داشت. ضخامت میانگین هر دیوار 1.02 متر بود. چهار دیوار A,B,C,D وجود داشت. دیوار های A,D ضخامت ثابت و دیوارهای B,C

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 30 مهر و 1 آبان ماه ۱۳۹۲

ضخامت متغیر داشتند اما مساحت سطح مقطع همه دیوارها برابر بود. دیوار A یک شیب ثابت 1:5 به سمت داخل داشت در حالی که دیوار D قائم بود. دیوارهای B, C با ضخامت متغیر بودند. دیوار B وجه جلویی شیبدار و دیوار C وجه پشتی شیبدار داشت. خاکریز در لایه‌های 61 سانتیمتری ریخته شد. مشاهده شد که دیوارهای A و B پایداری خود را تا ارتفاع 6.1 متر دیوار حفظ کردند اما دیوارهای B و D در حین ریختن لایه نهم ناپایدار شدند و ارتفاع پایدار حداکثر آنها 4.88 متر بود.

دیوار	مقطع
A ضخامت ثابت، دیوار با شیب یکنواخت 1:5 به سمت پشت دیوار	
B وجه جلویی شیبدار با شیب 1:5، وجه پشتی قائم	
C وجه پشتی شیبدار با شیب 1:5، وجه جلویی قائم	
D دیوار قائم	

شکل 1- مقاطع دیوارهای آزمایش شده توسط [1]

[3] Ching and Sao فشار جانبی وارد بر دیوار حایل را در حالت‌های محرک و مقاوم با در نظر گرفتن سطوح لغزش به دست آمده از تعادل حدی با رویکرد اجزاء منفصل مورد بررسی قرار دادند و توزیع فشار جانبی بر دیوار را به دست آوردند. Dickens and Walker [4] اولین مدلسازی دیوارهای حایل سنگ چین را با UDEC انجام دادند و اثر عواملی چون زاویه درزه‌های بلوک‌های دیوار و ارتفاع بلوکها را بر مدهای گسیختگی بررسی کردند. [5] Harkness et al آزمایشهای فیزیکی انجام شده توسط [1] Burgoyne را با UDEC مدل کردند و فشار جانبی و مدهای تغییر شکلی را برای هندسه‌های مختلف دیوار بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که دیوارهای حایل گسیختگی‌های دورانی یا لغزشی دارند اما قبل از گسیختگی تغییرشکل‌های مانند بیرون زدگی و شکم دادن دیوار (bulging) در آنها به صورت موضعی به وجود می‌آید. [6] Powrie et al اثر پارامترهایی چون گردگوشه‌گی بلوکها، شیب درزه بین بلوکها، زاویه اصطکاک خاکریز، زاویه اصطکاک و سختی درزه‌ها و همچنین تراکم-پذیری پی را بر مدهای تغییر شکلی و گسیختگی دیوارهای A, B شکل 2 بررسی

کردند. تحقیقات آنها نشان می‌داد که با کاهش زاویه اصطکاک خاکریز جابجایی دیوارها افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه اصطکاک درزه تا 26 درجه دیوار A پایداری خود را بدون تغییر شکل اضافی چندانی حفظ می‌کند و سپس فرو می‌ریزد در حالیکه دیوار B بلافاصله ناپایدار می‌شود که این مطلب نشان دهنده پایداری مرزی دیوار B است. [7] Zhang et al با استفاده از نرم افزار VISAGE یک تحلیل مبتنی بر اجزای محدود برای دیوارهای حایل سنگ چین ارائه دادند. [8] Claxton et al با صلب در نظر گرفتن بلوکهای سنگی، ساده سازی انجام داده و نتایج خود را با تحلیل‌های قبلی مقایسه کردند.

2. جزئیات مدل‌سازی عددی:

دیوار مدل‌شده در این تحقیق دیوار D آزمایش شده توسط [1] Burgoyne (دیوار D در شکل 1) است که بدین منظور از 51 بلوک سنگی صلب و یک بلوک تغییرشکل‌پذیر خاک استفاده شده است. پی نیز صلب در نظر گرفته شده است. مدل اختصاص یافته به خاکریز مدل الاستیک پلاستیک موهر کولمب بود و به درزه بین بلوکها و سطوح مشترک بین خاک و دیوار و خاک و پی نیز مدل موهر کولمب اختصاص یافت. در همه‌ی تحلیل‌ها فشار آب حفره‌ای صفر در نظر گرفته شد. وزن مخصوص مصالح دیوار 2650 کیلوگرم بر متر مکعب است که با توجه به زبر بودن سطح بلوکهای سنگی و پر نشدن فضای خالی بین آنها با ملات وزن مخصوص دیوار 2270 کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. مدول بالک و سختی برشی خاک در عمق افزایش می‌یابد. سایر مشخصات مصالح و درزه‌ها در جدول زیر آمده است.

جدول 1- مشخصات مصالح

مشخصه	دیوار	خاک
وزن مخصوص	22.7(kN/m ³)	15.5(kN/m ³)
مدول بالک	22000(MPa)	1- 8.2(MPa)
مدول الاستیسیته برشی	15000 (MPa)	0.6-5.4(MPa)
زاویه اصطکاک	-	28
سختی نرمال درزه	1000(MPa/m)	-
سختی برشی درزه	500(MPa/m)	-
زاویه اصطکاک درزه	45	-

یکی از مهم ترین چالش‌های پیش رو در آنالیز، انتخاب مقادیر مناسب برای سختی نرمال و برشی سطح مشترک خاک و دیوار و سطح مشترک خاک و پی است. از طرفی مقادیر این پارامترها می‌توانند دامنه وسیعی داشته باشند و اطلاعات آزمایشگاهی چندانی نیز در مورد آنها وجود ندارد. با توجه به منابع مختلف نسبت سختی نرمال به سختی برشی درزه‌ها مقادیر متفاوتی را می‌توانند داشته باشد. Ching and [3] Sao این مقدار را برابر نسبت مدول الاستیسیته به مدول الاستیسیته برشی خاک فرض کردند که با فرض ضریب پواسون برابر 0.25 برای خاک این نسبت برابر 2.5 بدست می‌آید.

[9] Obermayr et al مقدار سختی نرمال به سختی برشی را برابر 1.2 در نظر گرفتند. در مقالات دیگر این مقدار بین 1 تا 100 معرفی شده است. گروه مهندسی مشاور Itasca که ارائه دهنده نرم‌افزار UDEC است نیز مقدار حد اکثری را برای سختی نرمال و سختی برشی پیشنهاد می‌کند:

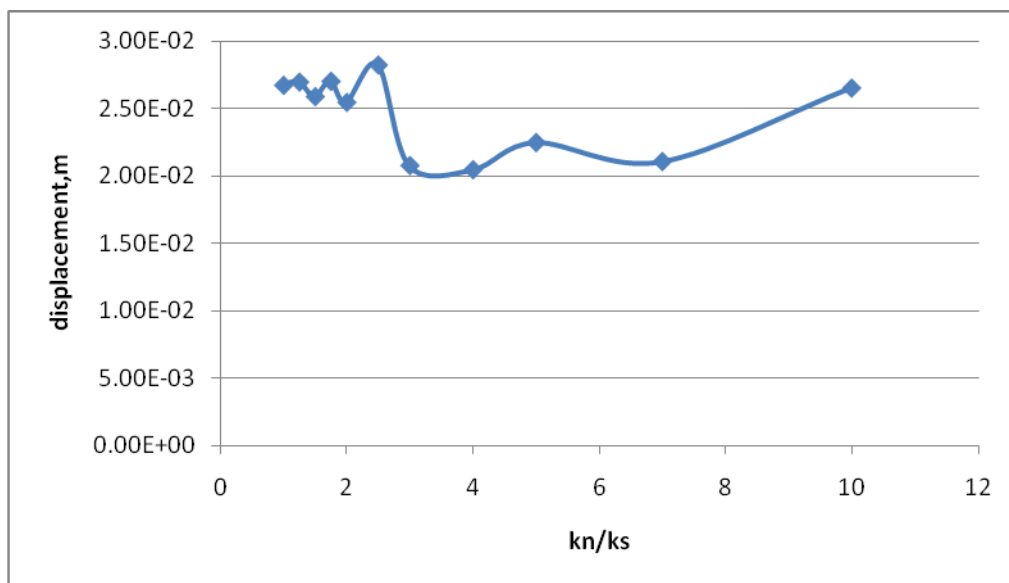
$$k_n, k_s \leq 10 \left[\max \left(\frac{K + 4G/3}{\Delta z_{\min}} \right) \right] \quad (1)$$

در این رابطه K و G مدول بالک و مدول الاستیسیته برشی مصالح و Δz_{\min} عرض حداقل مش‌های مجاور درزه در راستای عمود بر درزه است این مقدار حداکثر برای این مدل برابر 72 (MPa/m) است. در این تحقیق مقدار سختی نرمال سطح مشترک خاک و دیوار برابر متوسط مدول بالک لایه‌های مختلف خاک و سختی نرمال سطح مشترک خاک و پی برابر مدول بالک پایین‌ترین لایه خاک در نظر گرفته شد. همچنین نسبت سختی نرمال به سختی برشی بین 1 تا 100 در نظر گرفته شد و اثر تغییر نسبت سختی بر جابجایی دیوار بررسی گردید که نتایج حاصل از تحلیل‌ها در ادامه آمده است.

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 30 مهر و 1 آبان ماه ۱۳۹۲

جدول 2- نتایج تحلیل برای مقادیر مختلف نسبت سختی درزه های سطوح مشترک خاک و پی و خاک و دیوار (سختی نرمال ثابت)

Φ	kn/ks	پارامترهای سطح مشترک خاک و دیوار		پارامترهای سطح مشترک خاک و پی		جابجایی دیوار (m)
		kn (kN/m)	ks (kN/m)	kn (kN/m)	Ks (kN/m)	
28	1	4.6e6	4.6e6	8.2e6	8.2e6	0.02673
28	1.25	4.6e6	3.68e6	8.2e6	6.56e6	0.02697
28	1.5	4.6e6	3.07e6	8.2e6	5.47e6	0.02588
28	1.75	4.6e6	2.63e6	8.2e6	4.69e6	0.02702
28	2	4.6e6	2.3e6	8.2e6	4.1e6	0.02545
28	2.5	4.6e6	1.84e6	8.2e6	3.28e6	0.02824
28	3	4.6e6	1.53e6	8.2e6	2.73e6	0.02074
28	4	4.6e6	1.15e6	8.2e6	2.05e6	0.02043
28	5	4.6e6	9.2e5	8.2e6	1.64e6	0.02246
28	7	4.6e6	6.57e5	8.2e6	1.17e6	0.02104
28	10	4.6e6	4.6e5	8.2e6	8.2e5	0.02652
28	100	4.6e6	4.6e4	8.2e6	8.2e4	0.1494



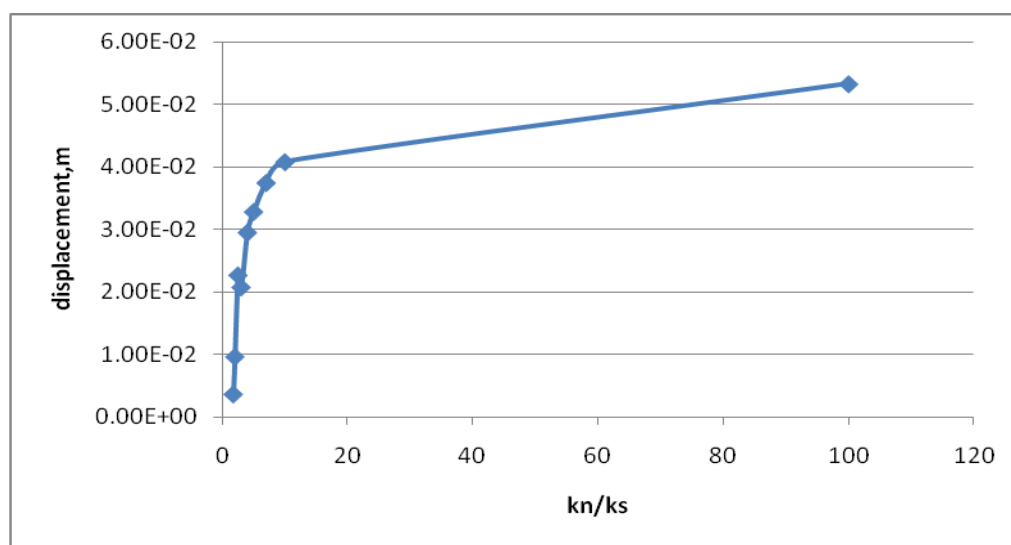
شکل 2- تغییرات جابجایی دیوار با نسبت های سختی مختلف (سختی نرمال ثابت)

همانطور که مشاهده می شود با افزایش مقدار نسبت سختی نرمال به سختی برشی به بیش از 2 تغییرات جابجایی دیوار روند تقریباً ثابتی به خود گرفته و به آرامی افزایش می یابد. البته جابجایی دیوار برای نسبت سختی برابر 100 بسیار زیاد و غیر منطقی است. در کل در یک سختی نرمال ثابت با تغییر نسبت سختی نرمال به سختی برشی در محدوده متعارف جابجایی دیوار کمتر از 40% تغییر می کند. در نمودار فوق سختی نرمال ثابت است و با کاهش سختی برشی نسبت سختی نرمال به سختی برشی افزایش می یابد. در گام بعد سختی برشی را ثابت در نظر می گیریم و با افزایش سختی نرمال نسبت سختی نرمال به سختی برشی افزایش می یابد.

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 30 مهر و 1 آبان ماه ۱۳۹۲

جدول 3- نتایج تحلیل برای مقادیر مختلف نسبت سختی درزه های سطوح مشترک خاک و پی و خاک و دیوار (سختی برشی ثابت)

Φ	kn/ks	پارامترهای سطح مشترک خاک و دیوار		پارامترهای سطح مشترک خاک و پی		جابجایی دیوار (m)
		kn (kN/m)	ks (kN/m)	kn (kN/m)	Ks (kN/m)	
28	1	1.53e6	1.53e6	2.73e6	2.73e6	دوران به سمت خاک
28	1.25	1.91e6	1.53e6	3.41e6	2.73e6	دوران به سمت خاک
28	1.5	2.3e6	1.53e6	4.1e6	2.73e6	دوران به سمت خاک
28	1.75	2.68e6	1.53e6	4.78e6	2.73e6	0.0036
28	2	3.06e6	1.53e6	5.46e6	2.73e6	0.0096
28	2.5	3.83e6	1.53e6	6.83e6	2.73e6	0.0227
28	3	4.59e6	1.53e6	8.19e6	2.73e6	0.02074
28	4	6.12e6	1.53e6	1.09e7	2.73e6	0.0295
28	5	7.65e6	1.53e6	1.37e7	2.73e6	0.0328
28	7	1.07e7	1.53e6	1.91e7	2.73e6	0.0375
28	10	1.53e7	1.53e6	2.73e7	2.73e6	0.0408
28	100	1.53e8	1.53e6	2.73e8	2.73e6	0.0533



شکل 3- تغییرات جابجایی دیوار با نسبت های سختی مختلف (سختی برشی ثابت)

با توجه به نمودار فوق مشاهده می گردد که جابجایی دیوار با افزایش سختی نرمال در سختی برشی ثابت روند افزایشی دارد و نوسان جابجایی دیوار نسبت به حالت قبل (که سختی نرمال ثابت بود و سختی برشی کاهش می یافت) کمتر است. می توان اینگونه نتیجه گرفت که سختی نرمال نسبت به سختی برشی تاثیر بیشتری بر جابجایی های دیوار دارد.

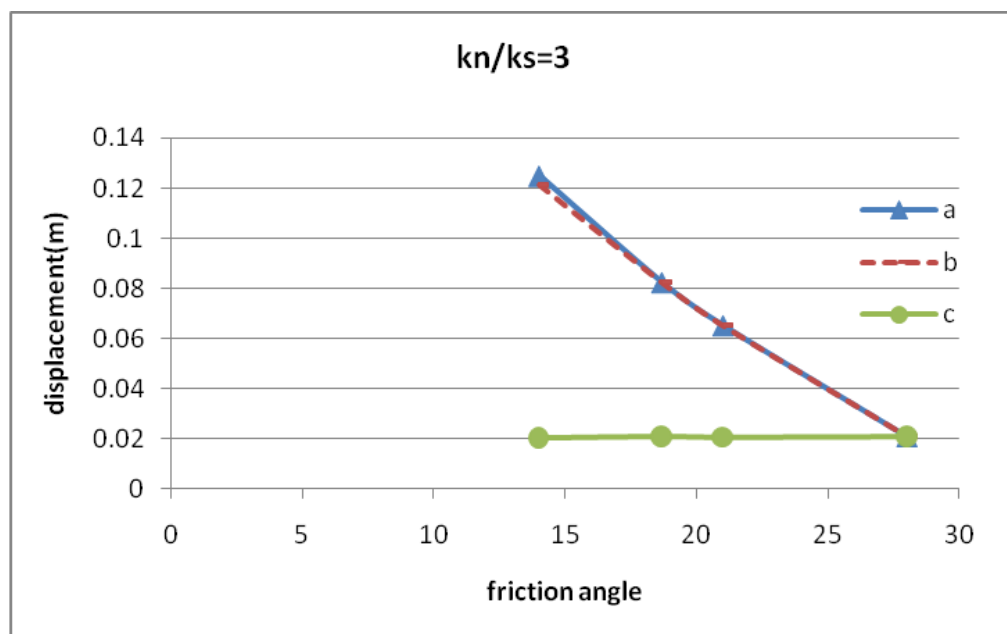
پارامتر دیگر سطح مشترک خاک و دیوار و خاک و پی زاویه اصطکاک آنهاست. Powrie et al [6] این مقدار را برابر زاویه اصطکاک خاک (28) فرض کرده اند. در این تحقیق زاویه اصطکاک سطح مشترک Φ و $1/2\Phi$ و $2/3\Phi$ و $4/3\Phi$ در نظر گرفته شد و برنامه اجرا شد و جابجایی های افقی بالاترین نقطه دیوار بدست آمد که در ادامه نتایج آن آورده شده است.

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 30 مهر و 1 آبان ماه ۱۳۹۲

جدول 4- نتایج تحلیل برای زوایای اصطکاک مختلف سطوح مشترک خاک و دیوار و پی

Φ	kn/ks	سطح مشترک خاک و دیوار		سطح مشترک خاک و پی		جابجایی دیوار (m)
		kn	ks	kn	ks	
14	3	4.60E+06	1.53E+06	8.20E+06	2.73E+06	0.125
18.67	3	4.60E+06	1.53E+06	8.20E+06	2.73E+06	0.0824
21	3	4.60E+06	1.53E+06	8.20E+06	2.73E+06	0.0652
28	3	4.60E+06	1.53E+06	8.20E+06	2.73E+06	0.02074

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اصطکاک سطوح مشترک جابجایی دیوار کاهش چشمگیری می‌یابد. جدول فوق مربوط به حالتی است که زاویه اصطکاک خاک و پی و خاک و دیوار هر دو تغییر می‌یابد. در ادامه اثر هر یک از سطوح تماس خاک با پی و خاک با دیوار ارزیابی می‌گردد.



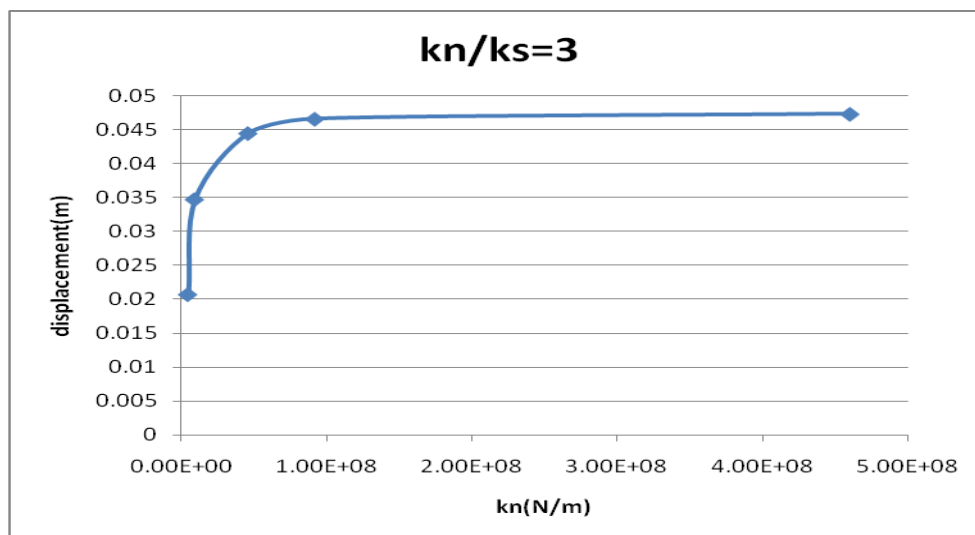
شکل 4- تغییرات جابجایی دیوار برحسب زاویه اصطکاک سطوح مشترک

در نمودار فوق منحنی a مربوط به حالتی است که زاویه اصطکاک سطح مشترک خاک و پی و خاک و دیوار تغییر می‌کند. منحنی b مربوط به حالتی است که فقط زاویه اصطکاک سطح مشترک خاک و دیوار تغییر می‌کند و زاویه اصطکاک سطح مشترک خاک و پی ثابت (برابر 28 درجه) است و منحنی c مربوط به حالتی است که فقط زاویه اصطکاک سطح مشترک خاک و پی تغییر می‌کند و زاویه اصطکاک سطح مشترک خاک و دیوار ثابت (برابر 28 درجه) است. همانطور که مشاهده می‌گردد سطح مشترک بین خاک و پی صلب اثر ناچیزی بر جابجایی دیوار دارد و عمده تغییر شکل‌های دیوار با تغییر مشخصات سطح مشترک خاک و دیوار اتفاق می‌افتد.

در تحلیل دیگر انجام شده سختی نرمال و برشی سطح مشترک خاک و دیوار همزمان به گونه ای تغییر کرد که نسبت سختی نرمال به سختی برشی ثابت (و برابر 3) باشد و زاویه اصطکاک نیز ثابت (و برابر 28 درجه) بود که نتایج حاصل از تحلیل در ادامه آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای مقادیر کمتر از $9.2E5(N/m)$ برای سختی نرمال همپوشانی بلوک‌ها از مقدار مجاز بیشتر شده و تحلیل متوقف می‌گردد.

جدول 5- اثر تغییر سختی نرمال و برشی درزه‌های سطح مشترک خاک و دیوار (با نسبت ثابت) بر جابجایی دیوار

Φ	kn/ks	kn	ks	جابجایی دیوار (m)
28	3	4.60E+04	1.53E+04	همپوشانی بلوکها بیش از حد مجاز
28	3	9.20E+04	3.07E+04	همپوشانی بلوکها بیش از حد مجاز
28	3	4.60E+05	1.53E+05	همپوشانی بلوکها بیش از حد مجاز
28	3	9.20E+05	3.07E+05	همپوشانی بلوکها بیش از حد مجاز
28	3	4.60E+06	1.53E+06	0.02074
28	3	9.20E+06	3.07E+06	0.03475
28	3	4.60E+07	1.53E+07	0.04449
28	3	9.20E+07	3.07E+07	0.0466
28	3	4.60E+08	1.53E+08	0.04732



شکل 5- نمودار تغییرات جابجایی بر حسب سختی نرمال سطح مشترک خاک و دیوار (در نسبت سختی نرمال به سختی برشی برابر 3)

3. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک دیوار حایل سنگ چین متشکل از بلوکها و پی صلب با استفاده از نرم افزار UDEC مدل شده و اثر مشخصات سطوح مشترک خاک و پی و خاک و سازه (زاویه اصطکاک، سختی نرمال و سختی برشی) بر رفتار تغییر شکلی آن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که پارامترهای سطح مشترک خاک و پی صلب تاثیر ناچیزی بر تغییر شکل‌های دیوار دارد. البته باید توجه داشت که سختی نرمال کمتر از مقدار خاصی به تجاوز همپوشانی بلوکها از معیار همپوشانی مجاز منجر شده و تحلیل متوقف می‌گردد. همچنین زاویه اصطکاک خاک و دیوار بیشترین تاثیر را بر جابجایی دیوار دارد. با کاهش سختی برشی در سختی نرمال ثابت (افزایش نسبت سختی نرمال به سختی برشی به بیش از 2 جابجایی دیوار روند ثابتی به خود می‌گیرد و سر انجام با مقایسه جابجایی‌های دیوار در

دو حالت تغییر سختی نرمال و سختی برشی می‌توان نتیجه گرفت که سختی نرمال نسبت به سختی برشی تاثیر بیشتری بر جابجایی‌های دیوار دارد.

4. مراجع

1. Cundall, P. A.(1971). "A Computer Model for Simulating Progressive Large-scale Movements in Blocky Rock Systems." Proc., Symp. Int. Soc. Rock Mechanics, Paper No. II-8.
2. Burgoyne, J. (1853). "Revetments of Retaining Walls." Corps Royal Eng Papers 1853;3:154_9.
3. Ching, S.C and Sao, J.C.(1994). "Discrete Element Analysis for Active and Passive Pressure Distribution on Retaining Wall" ,Computers and Geotechnics,16 pp 291-310
4. Dickens J.G, Walker P.J. (1996) "Use of distinct element model to simulate behaviour of dry-stone walls", Struct Eng Rev;8(2/3):187-99.
5. Harkness R.M., Powrie W., Zhang X., Brady K.C., O'Reilly M.P.(2000) "Numerical modeling of full scale tests on drystone masonry retaining walls", Géotechnique;50(2):165-79.
6. Powrie W., Harkness R.M., Zhang X., Bush D.I.(2002), "Deformation and failure modes of drystone retaining walls". Géotechnique;52(6):435-46.
7. Zhang X., Koutsabeloulis N.C., Hope S., Pearce A.(2004) "A finite element analysis for the stability of drystone masonry retaining walls". Geotechnique ; 54, No. 1, 57-60
8. Claxton M., Hart R.A., McCombie P.F., Walker P.J. (2005). "Rigid block distinct-element modeling of drystone retaining walls in plane strain", J Geotech Geoenviron Eng 2005;131(3):381-9.
9. Obermayr M., Dressler K., Vrettos C., Eberhard P.(2011) "Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method". Journal of Terramechanics 48 (2011) 347–358