

پیش بینی کلاس حساسیت رمبندگی خاک های لسی با بکارگیری روش رگرسیون لجستیک رتبه ای، شمال شرق ایران

مجتبی حیدری^{۱*}، صدیقه زال آقایی^۲، محمدرضا نیکودل^۳، اصغر سیف^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۴

چکیده

در این مطالعه از روش رگرسیون لجستیک رتبه ای (OLR) برای پیش بینی رده حساسیت رمبندگی خاک های لسی استفاده شده است. حساسیت رمبندگی (Is) خاک های لسی، یک پارامتر مهم در پیش بینی نحوه توزیع و تمرکز فروچاله های شبه کارستی در استان گلستان در شمال شرق ایران است. با انجام آزمون های تحکیم منفرد، تحت فشارهای مختلف، پارامترهای ضریب رمبندگی، زمان لازم برای ۹۰٪ نشست ناشی از رمبندگی خاک ها (T_{90%}) و وضعیت حساسیت رمبندگی خاک ها به صورت تجربی، در ۶۲ نقطه از دشت گرگان تعیین گردید. با استفاده از برخی ویژگی های فیزیکی شاخص خاکها (دانه بندی، تخلخل، رطوبت اولیه، بارش، آب و هوا، حد روانی، کربنات کلسیم، پوشش گیاهی و درجه اشباع) به روش غیر مستقیم و با استفاده از روش رگرسیون لجستیک رتبه ای و برنامه نویسی در نرم افزار R، میزان احتمال قرارگیری خاکها در کلاسهای با حساسیت رمبندگی چهارگانه شدید، نسبتاً شدید، متوسط و کم در مدل پیشنهادی، با دقت بیش از ۷۰٪ برآورد شده است. داده های تجربی بدست آمده از وضعیت کلاس حساسیت رمبندگی خاکهای رمبنده مناطق مشهد، سرخس و سمنان که به روش مستقیم اندازه گیری شده است، صحت کارکرد مدل پیشنهاد شده در این تحقیق را نشان داده است.

کلید واژه ها: حساسیت رمبندگی، مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای، لس، استان گلستان

۱. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان moj.heidari@basu.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴. عضو هیات علمی گروه آمار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

بر طبق نظر اسمالی و همکاران (Smalley et al., 2011) خاک های لسی از جمله نهشته های بادی مشکل آفرین هستند که دارای تخلخل زیاد، ساختمان باز، سیمان شدگی ضعیف و غیر اشباع می باشند. مطالعه فرچن و همکاران (Frechen et al., 2009) نشان داد که گسترش لس ها در استان گلستان، در شمال شرق ایران بیش از ۱۷٪ است. گسترش لس ها باعث وقوع فرسایشهای خندقی، فروچاله های شبه کارستی، ترک خوردن زمین، ریزش دیواره های کانال های آبرسانی، نشست های ناگهانی و نامتقارن، ترک خوردن دیوار منازل، تخریب مراتع و فرسایش خاک، تخریب جاده ها و پل ها شده است (شکل ۱). تحقیقات اندکی در مورد عوامل موثر بر وقوع فروچاله های شبه کارستی در استان گلستان انجام شده است که از جمله آنها می توان به لشکری پور و همکاران (۱۳۹۶)، حافظی مقدس و همکاران (۱۳۹۰)، صالحی و همکاران (Salehi et al., 2015)، حسین‌علیزاده و همکاران (Hosseinalizadeh et al., 2018)، کریم‌نژاد (Kariminejad et al., 2019)، زال آقایی و همکاران (Zalaghaei et al., 2022) اشاره کرد.

برخی از محققین مانند جینگز و نایت (Jennings and Knight, 1975)، صالحی و همکاران (Salehi et al., 2015)، ژوان (Guan, 1983)، سیه (Xie, 2018) و هوو و همکاران (Hou et al., 2019) در برآورد اولیه از علت وقوع پدیده های مخرب از جمله فروچاله های شبه کارستی، میزان ضریب رمبندگی (Ic) خاک های لسی را مهمترین پارامتر در بیان استعداد وقوع این پدیده می دانند.

اما برخی از تحقیقات جدید توسط لوتنگر (Lutenegger, 2012)، جانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) و زال آقایی و همکاران (Zalaghaei et al., 2022) نشان داد که ممکن است ریسک وقوع خطر پدیده های مخرب مناطقی دارای ضریب رمبندگی بیشتر، کمتر از ریسک وقوع در مناطق با ضریب رمبندگی کمتر باشد. لذا مفهوم جدید حساسیت رمبندگی (Is) (sensitivity collapse) بر مبنای میزان شدت و

سرعت رمبندگی، تعریف شده است. زال آقایی و همکاران (Zalaghaei et al., 2022) نشان دادند که با تغییر کلاس حساسیت رمبندگی خاکهای لس استان گلستان از کلاس حساسیت کم تا کلاس حساسیت شدید، تعداد فروچاله های شبه کارستی افزایش زیادی نشان می دهد (شکل ۲). همچنین جانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) نشان دادند که تعداد پدیده های مخرب مانند نشست و ترک خوردن ساختمانهای مسکونی، وقوع زمین لغزشها و ترک خوردن زمین با افزایش کلاس حساسیت خاکهای رمبنده، بیشتر می شود.

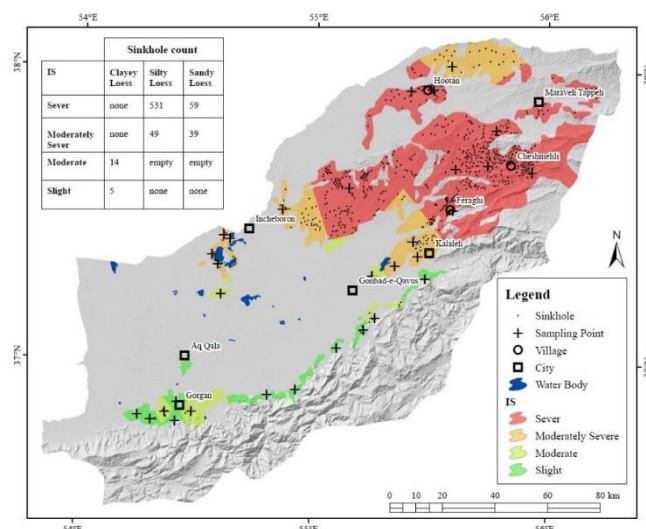
با توجه به پتانسیل خردشدگی و دست خوردگی لس ها در حین آماده سازی نمونه برای آزمون تحکیم و صرف زمان زیاد برای تعیین شدت و مدت رمبندگی خاکها در تنش های مختلف و با توجه به اهمیت پارامتر حساسیت رمبندگی خاکهای لسی در برآورد تمرکز فروچاله ها در استان گلستان، دراین تحقیق رده حساسیت رمبندگی خاکهای لسی استان گلستان با بکارگیری روش رگرسیون لجستیک رتبه ای به شکل غیر مستقیم و با بهره گیری از برخی خواص شاخص خاکها تعیین شده است. برای صحت سنجی مدل پیشنهادی، از یافته های تجربی خاکهای رمبنده مناطق مشهد، سرخس و سمنان استفاده شده است.

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی

فلات لسی شمال شرق ایران شامل نهشته های لسی است که از جنوب تا شمال استان گلستان بین عرض جغرافیایی $38^{\circ}15'30''$ تا $36^{\circ}30'00''$ N و طول جغرافیایی $54^{\circ}00'00''$ تا $56^{\circ}00'00''$ E گسترش دارند (شکل ۲). فرچن و همکاران (Frechen et al., 2009) نشان دادند که ضخامت لس ها در استان گلستان از شمال شرق به جنوب غرب استان کاهش می یابد. رضایی و همکاران (Rezaiy et al., 2011) بر مبنای ویژگی های ژئوتکنیکی و رسوب شناسی، لس های منطقه مورد مطالعه به ترتیب از جنوب به شمال به زون لس رسی (زون I)، زون لس سیلتی (زون II) و زون لس ماسه ای (زون III) دسته بندی شده اند.



شکل ۱. خطرات ناشی از گسترش لس ها در استان گلستان الف) فروچاله در روستای چشمه لی ب) گسترش فرسایش خندقی در روستای چشمه لی ج) ترک خوردگی زمین در شهر فراغی د) نشست نامتقارن ساختمان مسکونی در شهر فراغی ه) ترک خوردن دیوار منازل مسکونی در شهر فراغی



شکل ۲. توزیع فروچاله های شبه کارستی در مناطق با حساسیت رمبندگی متفاوت (Zalaghaei et al., 2022)

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. روشهای آزمایشگاهی

برای ارزیابی پارامترهای زمین شناسی مهندسی کنترل کننده توزیع فروچاله های شبه کارستی، نمونه های دست نخورده از ۶۲ نقطه از زون های I، II و III تهیه شده است. برخی از ویژگیهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاکهای لسی بر مبنای استانداردهای ASTM تعیین شده است (جدول ۱).

آزمون تحکیم منفرد بر مبنای استاندارد (ASTMD5333-03, 2003) انجام شده است. برای تعیین ضریب رمبندگی، سرعت رمبندگی، از هر محل نمونه برداری، تعداد ۷ نمونه به قطر ۷۵mm و ارتفاع ۲۰mm آماده سازی شده است. این نمونه ها تحت فشار ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. پله های بارگذاری به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده اند. میزان تغییر شکل در هر مرحله از بارگذاری در فواصل زمانی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۶، ۹، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۴۵، ۶۰ دقیقه قرائت شده است. سپس با فواصل زمانی هر ۳۰ دقیقه تا رسیدن به شرایط پایدار (مقدار تغییر شکل کمتر از ۰/۱ mm در ساعت) ادامه یافته است.

۳-۲. روش رگرسیون لجستیک رتبه ای

در مطالعات هاسمر و لمشاو (Hosmer and Lemeshow, 2000) روشی برای مدل کردن روابط بین یک متغیر وابسته گسسته (باینری، رتبه ای، اسمی) و چند متغیر مستقل (گسسته یا پیوسته) بکار گرفته شد. هنگامیکه که برآورد یک متغیر رتبه ای مورد توجه است روش های محاسبات قطعی که شالوده ریاضیات کلاسیک است جای خود را به اصول احتمال و شانس تعلق یک نمونه به یک کلاس از متغیر وابسته خروجی می دهد. در این پژوهش برای تعیین کلاس حساسیت رمبندگی خاکهای لسی (متغیر وابسته) که در ۴ کلاس شدید، نسبتا شدید، متوسط و کم دسته بندی شده اند، وضعیت همبستگی ۱۰ ویژگی شاخص خاکها (متغیرهای مستقل) با متغیر وابسته، به روش رگرسیون لجستیک رتبه ای (Ordinal Logistic Regression) (OLR) بررسی شده است. در این

مقاله از روش همزمان استفاده شده است، به طوریکه تمامی متغیرها در یک مرحله وارد مدل شده اند. متغیرهای ناهمبسته حذف و متغیرهای با همبستگی قابل قبول تعیین شده اند و نهایتا روابط کاربردی برای تعیین کلاس خاکها با درصد احتمال مشخص، استخراج شده است.

۴. بحث

۴-۱. تغییرات شدت رمبندگی

جدول شماره ۱ برخی از ویژگی های فیزیکی - مکانیکی و شیمیایی خاک های لسی نقاط نمونه برداری را نشان می دهد. برای بیان شدت رمبندگی خاکهای لسی از ضریب رمبندگی استفاده می شود که مقدار آن از معادله (۱) محاسبه می شود:

$$I_c = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (1)$$

که در این رابطه Δh تغییر شکل قائم نمونه خاک بعد از اشباع شدن تحت تنش ثابت است و h_0 ارتفاع اولیه نمونه خاک می باشد. تغییرات مقادیر ضریب رمبندگی نمونه های زون های سه گانه در جدول (۱) نشان داده شده است.

۴-۲. سرعت رمبندگی نمونه های خاک

برای تعیین سرعت رمبندگی خاکهای منطقه مورد مطالعه، میزان تغییر شکل در هر مرحله از بارگذاری بعد از اشباع شدن نمونه، در فواصل زمانی مشخص، قرائت شده است. قرائت تغییر شکل، تا رسیدن به مقدار تغییر شکل کمتر از ۰/۱ mm در ساعت ادامه یافته است.

زمان لازم برای تغییر شکلهای کمتر از ۰/۱ mm در ساعت به عنوان زمان پایداری (stability time) نامیده می شود. جانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) بر مبنای تجارب دیگران نشان دادند که چون مدت لازم برای ۱۰٪ نشست پایانی خاک های رمبنده، در مقایسه با زمان لازم برای ۹۰ درصد نشست این خاکها، بسیار زیاد می باشد، پیشنهاد شده است که برای مقایسه سرعت رمبندگی این خاکها، به جای استفاده از زمان پایداری، زمان لازم برای ۹۰ درصد نشست ($T_{90\%}$) آنها بکار گرفته شود. در جدول ۱ ($T_{90\%}$) نمونه های خاک زون های سه گانه ارائه شده است.

جدول ۱. برخی از خواص فیزیکی مکانیکی و شیمیایی خاکها و کلاس آنها از نظر حساسیت رمندگی

location	sample Number	X1=sand %	X2=silt %	X3=clay %	X4=w %	X5=Sr %	X6=n%	X7=CaCO3 %	X8=LL%	X9=SL	X10=Weighted precipitation	IC	IS	Y(Lab)
Seyyd Miran	S-M1	2.12	54.58	36.5	3.89	12.1	46.20	27.17	51.8	6.8	0.5	1.44	SL	1
	S-M2	1.9	52.3	38.8	4.8	16.45	43.80	19.73	52	8.4	0.5	10.31	M.	2
	S-M3	2.1	53.62	37.4	6.45	24.57	41.20	18.08	51.64	8.8	0.5	1.78	SL	1
	S-M4	3.1	51.7	38.7	4.14	13.23	45.52	21.12	53.1	7.5	0.5	1.52	SL	1
	S-M5	1.8	53.05	39.03	5.38	19.59	42.30	19.05	55.2	8.1	0.5	1.15	SL	1
	S-M6	2.6	50.12	41.06	7.18	25.12	43.30	23.25	51.5	9.5	0.5	1.44	SL	1
Saad Abad	SA1	2.8	55.36	34.34	4.17	13.5	45.40	25.5	50.4	9.8	0.5	1.39	SL	1
	SA2	2.49	54.97	35.54	4.43	16.32	41.72	18.4	48.7	10.3	0.5	9.82	M.	2
	SA3	1.85	53.47	38.18	5.53	22.4	40.05	16.36	49.1	10.7	0.5	6.64	SL	1
	SA4	2.35	54.89	36.52	4.51	16.52	42.32	22.7	52.1	9.1	0.5	1.52	SL	1
	SA5	1.46	52.75	39.41	5.52	19.41	43.35	19.67	50.7	11.2	0.5	1.57	SL	1
	SA6	2.11	50.3	40.8	5.26	20.8	40.50	22.84	53.12	11.5	0.5	1.41	SL	1
Baraffan	B1	6.35	65.83	26.61	6.06	17.6	47.80	31.34	26.81	13.6	0.25	2.22	SL	1
	B2	5.89	64.68	28.03	10.86	33.51	46.30	35.4	36.74	12.8	0.25	1.36	SL	1
	B3	6.05	65.5	27.43	6.21	21.1	43.90	34.11	26.85	11.8	0.25	6.94	M.	2
	B4	7.37	60.54	28.37	5.27	17.2	44.90	30.23	28.87	11.5	0.25	1.61	SL	1
	B5	8.03	62.92	27.15	9.59	30.2	45.80	31.23	27.76	12.4	0.25	1.26	SL	1
	B6	6.32	66.6	25.64	7.63	22.69	47.20	33.23	30.69	14.1	0.25	1.45	SL	1
Agh Enam	AG-E1	1.01	78.02	20.67	11.51	41.9	42.50	18.24	34.6	12.8	0.5	1.1	SL	1
	AG-E2	0.98	77	21.55	12.72	49.86	40.70	16.4	33.9	10.4	0.5	0.96	SL	1
	AG-E3	1.16	78.3	20.42	11.73	55.35	36.30	22.91	34.8	13.5	0.5	0.74	SL	1
	AG-E4	1.43	76.5	21.67	9.97	42.65	38.60	19.93	37.7	10.6	0.5	1.31	SL	1
	AG-E5	1.39	74.1	23.19	11.48	43.98	41.25	21.42	39.4	11.2	0.5	0.97	SL	1
	AG-E6	1.09	72.9	25.03	12.66	50.05	40.50	18.6	40.1	13.2	0.5	1.44	SL	1
Agh Abad	AG1	1.5	76	22.01	5.28	15.1	48.40	28.94	31	13.5	0.75	14.95	M.	2
	AG2	0.85	77.3	21.7	5.7	14.21	51.80	36.65	30.7	13.7	0.75	17.79	M.s.	3
	AG3	1.12	75.8	22.33	5.72	15.63	49.50	29.65	32.84	13.2	0.75	12.5	M.s.	3
	AG4	0.76	76.9	21.58	6.68	17.42	50.70	29.45	33.2	14	0.75	13.8	M.	2
Gonbad-Kalaleh	G-C1	2.5	80.65	16.65	7.2	19.44	49.60	41.13	32.6	10.8	0.5	7.21	M.s.	3
	G-C2	1.8	80.27	17.8	7.71	23.6	46.50	33.38	32.7	12.3	0.5	4.39	M.s.	3
	G-C3	2.21	79.5	18.09	7.77	22.56	47.80	40.1	34.2	11.9	0.5	7.69	M.s.	3
	G-C4	2.3	75.2	21.87	8.31	23.39	48.60	38.9	35.5	11.2	0.5	8.65	M.	2
Feraghi	F1	13.2	58.2	27.3	4.73	19.31	39.45	20.4	29.5	19.3	0.75	15.2	s.	4
	F2	7.1	62.2	28.9	4.03	17.2	38.40	21.2	24.3	21.8	0.75	18.1	s.	4
	F3	9.2	64	26.1	4.65	18.92	39.52	28.7	31.2	17.6	0.75	14.3	s.	4
	F4	8.4	66.2	24.53	4.38	18.3	38.90	22.54	27.42	18.3	0.75	12.79	s.	4
	F5	11.6	58.9	28.54	4.75	19.2	39.70	23.15	33.05	16.4	0.75	16.85	s.	4
	F6	10.2	63.2	25.21	4.9	20.5	38.73	23.35	35.1	25	0.75	15.81	s.	4
Cheshme li	CH1	11.7	64.1	23.2	5.24	6.6	44.40	24.1	22.1	23.3	0.75	19.1	s.	4
	CH2	13.2	68	17.3	7.16	7.1	40.20	26.2	22.4	17.7	0.75	21.3	s.	4
	CH3	15.1	68.3	15.8	8.8	7.85	40.33	30.1	19.85	19.4	0.75	19.2	s.	4
	CH4	12.1	64.6	22.19	8.53	6.4	42.30	28.65	24.11	18.1	0.75	18.96	s.	4
	CH5	10.35	69.5	19.24	7.16	7.35	43.60	28.43	19.86	16.6	0.75	19.45	s.	4
	CH6	14.4	67.8	16.44	6.42	9.12	41.12	27.54	17.65	25.1	0.75	20.53	s.	4
Alagol	AL1	33.1	66.79	0	4.47	6.62	46.40	35.41	-	29.8	1	18.61	M.s.	3
	AL2	32.4	67.2	0	3.45	7.3	50.80	23.37	-	31.7	1	20.2	M.s.	3
	AL3	34.6	65	0	5.46	5.36	42.10	36.65	-	32.8	1	16.83	M.s.	3
	AL4	30.4	66.1	2.58	5.23	8.5	47.32	31.15	2.4	30.7	1	15.26	M.	3
	AL5	29.8	65.8	2.9	4.91	7.3	49.68	32.52	5.3	32.3	1	17.23	M.s.	3
	AL6	27.2	67.2	3.83	5.38	5.2	44.52	33.05	7.2	35.4	1	18.69	M.	3
Tangli	T1	24.9	62.8	8.1	4.95	8.41	48.30	36.16	18.03	22.8	1	5.82	M.	2
	T2	25.16	63.2	7.8	4.16	9.36	49.70	39.05	17.7	23.5	1	17.33	M.s.	3
	T3	26.3	60.2	9.5	5.63	11.82	47.20	32.33	18.3	21.8	1	4.66	M.s.	3
	T4	23.8	61.8	11.12	6.5	8.5	47.65	34.4	19.5	23.1	1	6.5	M.	2
	T5	21.9	62.4	12.08	5.32	9.7	48.12	36.53	18.2	21.6	1	12.4	M.s.	3
	T6	25	60	10.85	5.63	11.69	49.25	33.8	19.8	24.4	1	15.26	M.s.	3
Hootan-Korand	H1	36.2	57.3	4.9	4.1	6.13	49.80	41.4	-	18.4	1	24.8	S.	4
	H2	35.1	59.1	4.4	3.3	5.5	51.30	33.2	-	17.3	1	26.8	M.s.	3
	H3	34.8	58.3	3.3	5.32	6.7	44.20	38.9	-	16.5	1	20.71	S.	4
	H4	35.8	57.5	4.87	4.8	6.4	48.52	36.32	5.1	17.7	1	20.53	M.s.	3
	H5	34.5	58	4.93	5.6	8.7	49.62	35.46	7.3	19.5	1	18.65	s.	4
	H6	33.8	59.7	3.76	3.8	9.4	46.36	38.83	4.9	22.1	1	19.23	M.s.	3

شده اند. برای ارزیابی صحت و کارایی این دسته بندی، مقادیر I_c و $T_{90\%}$ برای ۶۲ نقطه از استان گلستان محاسبه شده است و وضعیت حساسیت رمبندگی خاک های لسی سه زون I، II و III تعیین گردید (جدول ۱). همانطور که مشاهده می شود در زون I که خاک های لسی رسی گسترش دارند میزان حساسیت خاک کم می باشد. در زون II که خاک های لسی سیلانی گسترش دارند، میزان حساسیت خاک شدید و در برخی از نقاط نسبتا شدید است. ولی در زون III علیرغم اینکه مقدار ضریب رمبندگی خاک بیشتر از زون II می باشد، حساسیت رمبندگی خاک ها اکثرا نسبتا شدید و ندرتا شدید است.

۴-۴. نتایج روش رگرسیون لجستیک رتبه ای (OLR)
برای پیش بینی قرارگرفتن یک متغیر پاسخ رتبه ای (کلاس حساسیت رمبندگی خاکهای لسی) در یک طبقه مشخص با استفاده از تعدادی متغیر مستقل (۱۰ متغیر) از رگرسیون لجستیک رتبه ای در محیط نرم افزاری R استفاده شده است. با انتخاب ۶۲ نمونه، مشخصات ۱۰ متغیر مستقل در ۱۰ ستون از X_1 تا X_{10} ، در جدول (۱)، وارد نرم افزار R شد. همان کمیت پاسخ مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای است که بر اساس حساسیت رمبندگی خاکها به چهار کلاس ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (نسبتا شدید) و ۴ (شدید) تقسیم شده است. در این روش، داده های جدول (۱) به محیط نرم افزار R منتقل شده است. با کدنویسی در برنامه R برای برازش داده ها بر اساس رگرسیون لجستیک رتبه ای لازم است پکیج های AER و Mass فراخوانی شوند. فرض کنید Y خروجی کیفی مدل با تعداد J دسته باشد.

بنابر این احتمال وقوع $P(Y \leq j)$ برابر است با احتمال تجمعی وقوع Y کوچکتر یا مساوی دسته مشخص $J=1, \dots, J$ مدل نسبت بخت های متناسب، یکی از مدل های متنوع رگرسیون لجستیک رتبه ای است.

در جدول (۲) برخی از ویژگیهای آماری خواص فیزیکی- مکانیکی نمونه خاکهای لسی استان گلستان ارائه شده است. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می شود حداقل دامنه تغییرات برای متغیرهای X_9 ، X_{10} و حداکثر دامنه تغییرات برای متغیر X_8 مشاهده می شود. بیشترین انحراف معیار برای متغیر X_8 است که بیشترین دامنه تغییرات را نیز داراست. همچنین می توان ادعا نمود که با توجه به اینکه چولگی در بازه (۲،۲-) متغیر است، لذا می توان گفت که داده ها دارای توزیع نرمال هستند. برای کنترل میزان همبستگی متغیرهای مستقل و همچنین حذف متغیرهای هم خطی چندگانه و متغیرهایی که احتمالا اثر یکسانی دارند از بررسی همبستگی متغیرها در نرم افزار Minitab v18.1 استفاده شده است. نتایج این بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است. اعداد داخل پرانتز بیانگر مقادیر P_{value} آنها می باشد.

همانطور که مشاهده می شود متغیرهای X_2 ، X_3 ، X_4 ، X_5 و X_6 دارای کمترین همبستگی با یکدیگر بوده و به عنوان متغیرهای مستقل مطلوب در مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای وارد می شوند.

۳-۴. تعیین کلاس حساسیت رمبندگی خاکها به روش مستقیم

با در نظر گرفتن دو پارامتر شدت رمبندگی (I_c) و سرعت رمبندگی ($T_{90\%}$) تعریف شده توسط جانگ و همکاران (Zhang et al., 2018)، طبقه بندی حساسیت رمبندگی خاکها ارائه شده است (جدول ۴). با استفاده از نتایج آزمون های آزمایشگاهی، خاک ها بر اساس مقدار ضریب رمبندگی I_c به ۴ دسته تقسیم شده اند:

$$I_c < 1.5, 1.5 < I_c \leq 3, 3 < I_c \leq 7, I_c > 7.$$

همچنین خاکها بر اساس $T_{90\%}$ به چهار دسته $T_{90\%} < 5 \text{ min}$ ، $5 \text{ min} < T_{90\%} \leq 15 \text{ min}$ ، $15 \text{ min} < T_{90\%} \leq 60 \text{ min}$ ، $T_{90\%} > 60 \text{ min}$ تقسیم شده اند. بر اساس دو فاکتور شدت (I_c) و مدت زمان رمبندگی ($T_{90\%}$) خاک ها به چهار دسته با حساسیت رمبندگی (Is) کم، متوسط، متوسط تا شدید و شدید تقسیم

جدول ۲. برخی از ویژگیهای آماری خواص فیزیکی - مکانیکی نمونه های خاک استان گلستان

متغیر	دامنه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی		کشیدگی	
مستقل	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
x1	2.00	1.00	3.00	1.8871	.81190	.212	.304	-1.449	.599
x2	35.44	.7	36.20	12.3887	12.37786	.809	.304	-.916	.599
x3	30.53	50.12	80.65	64.4356	8.43519	.280	.304	-.816	.599
x4	41.06	..00	41.06	20.7055	12.01467	-.094	.304	-.939	.599
x5	50.15	5.20	55.35	17.7079	11.88467	1.511	.304	2.058	.599
x6	15.50	36.30	51.80	44.7065	3.95948	-.083	.304	-1.107	.599
x7	25.04	16.36	41.40	28.6774	7.15767	-.023	.304	-1.205	.599
x8	55.20	.00	55.20	28.0824	16.05210	-.102	.304	-.820	.599
x9	.75	.25	1.00	.6855	.24768	-.080	.304	-1.143	.599
x10	.75	.25	1.00	.6855	.24768	-.080	.304	-1.143	.599

جدول ۳. ضرایب تعیین و مقادیر P_{value} (داخل پراتنز) متغیرهای مستقل

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
x2	0.856 (0.000)								
x3	0.054 (0.676)	-0.212 (0.098)							
x4	-0.861 (0.000)	-0.650 (0.000)	-0.326 (0.010)						
x5	-0.656 (0.000)	-0.630 (0.000)	0.379 (0.002)	0.410 (0.001)					
x6	0.489 (0.000)	0.388 (0.000)	0.113 (0.381)	-0.463 (0.000)	-0.456 (0.000)				
x7	0.640 (0.000)	0.558 (0.000)	0.213 (0.096)	-0.660 (0.000)	-0.480 (0.000)	0.688 (0.000)			
x8	-0.843 (0.000)	-0.890 (0.000)	-0.180 (0.096)	0.939 (0.000)	0.517 (0.000)	-0.395 (0.000)	-0.638 (0.000)		
x9	0.921 (0.000)	0.829 (0.000)	-0.063 (0.624)	-0.776 (0.000)	-0.629 (0.000)	0.319 (0.010)	0.396 (0.010)	-0.749 (0.000)	
x10	0.921 (0.000)	0.829 (0.000)	-0.063 (0.624)	-0.776 (0.000)	-0.629 (0.000)	0.319 (0.010)	0.396 (0.010)	-0.749 (0.000)	1.000

جدول ۴. طبقه بندی خاکهای لسی بر اساس حساسیت رمبندگی خاکها (Zhang et al., 2018)

T90 (min)	I_c (%)		
	$0.015 < I_c \leq 0.03$	$0.03 < I_c \leq 0.07$	$I_c > 0.07$
$60 < T$	Slight	Slight	Moderate
$15 < T \leq 60$	Slight	Moderate	Moderate severe
$5 \leq T \leq 15$	Moderate	Moderate severe	Severe
$T < 5$	Moderate severe	Severe	Severe

2006)، کیم و کانگ (Kim and Kang, 2013) نیز بیان شده است.

برونداد مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای در جدول ۵ نشان داده شده است.

بنابراین با توجه به ضرایب ارائه شده در جدول ۶، معادله رگرسیون لجستیک به صورت رابطه زیر می باشد:

$$\ln\left(\frac{P(Y \leq 1)}{P(Y > 1)}\right) = -53.86 + 0.72X_2 + 0.74X_3 + 0.73X_4 - 0.26X_5 - 0.35X_6 \quad (7)$$

(۷)

$$\ln(P(Y \leq 1)) = e^{-53.86 + 0.72X_2 + 0.74X_3 + 0.73X_4} \quad (8)$$

$$a = 0.72X_2 + 0.74X_3 + 0.73X_4 - 0.26X_5 - 0.35X_6 \quad (9)$$

$$(10) \quad P(Y \leq 1) = P(Y = 1) = \frac{e^{53.86-a}}{1 + e^{53.86-a}}$$

$P(Y = 3)$:

$$P(Y \leq 2) = \frac{e^{51.47-a}}{1 + e^{51.47-a}} \quad (11)$$

$$P(Y \leq 3) = \frac{e^{49.89-a}}{1 + e^{49.89-a}}$$

$$P = (Y \leq 4) = 1$$

$$P(Y = 2) = P(Y \leq 2) - P(Y < 2) = P(Y \leq 2) - P(Y = 1) \quad (12)$$

$$P(Y = 3) = P(Y \leq 3) - P(Y \leq 2) \quad (13)$$

$$P(Y = 4) = P(Y \leq 4) - P(Y \leq 3) = 1 - P(Y \leq 3) \quad (14)$$

با داشتن معادلات ۱۲ تا ۱۴ و با داشتن درصد ذرات ماسه، سیلت و رس و همچنین درصد رطوبت و درجه اشباع خاکهای لسی می توان احتمال قرارگیری خاک در هر کلاس را پیش بینی نمود. جدول (۶) کلاسهای پیش بینی شده توسط مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای و درصد احتمال آنها در هر کلاس را نشان می دهد. در این جدول می توان کلاسهای پیش بینی شده با کلاسهای تعیین شده به روش تجربی را مقایسه نمود. همانطور که مشاهده می شود بیش از ۷۲/۵۸ درصد کلاس نمونه ها توسط این مدل، به درستی پیش بینی شده است. بیشترین خطای مدل پیشنهادی (۴۷/۰۵ درصد) در پیش بینی کلاس با درجه حساسیت متوسط است.

چنانچه در مدل p متغیر مستقل و یک متغیر پاسخ رتبه ای با k سطح وجود داشته باشد، مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای با نسبت بخت های متناسب به صورت زیر تعریف می شود:

$$\ln\left(\frac{p(Y \leq j | x_1, \dots, x_p)}{p(Y > j | x_1, \dots, x_p)}\right) = a_j + \beta_p x_p + \dots + \beta_1 x_1, \quad j = 1, \dots, k-1 \quad (2)$$

و یا :

$$\text{logit}(p(Y \leq j)) = a_j + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p, \quad j = 1, \dots, k-1 \quad (3)$$

k : تعداد رده های متغیر وابسته رگرسیون لجستیک رتبه ای
ضمنا با توجه به روابط زیر می توان احتمال قرار گرفتن متغیر پاسخ در هریک از طبقات را نیز محاسبه کرد:

$$P(Y = j) = P(Y \leq j) - P(Y \leq j-1), \quad j = 2, \dots, k \quad (4)$$

لذا احتمال قرارگیری در رده شدید برابر است با :

$$P(Y \leq 1) = P(Y = 1) = P_i \quad (5)$$

و احتمال قرارگیری در دسته های با شدت کم، متوسط یا نسبتا شدید برابر است با:

$$P(Y > 1) = P_i \quad (6)$$

نظر به اینکه متغیرهای مستقل X_{10} and X_9, X_8, X_7, X_5, X_1 در تعیین کلاس حساسیت رمبندگی خاکهای لسی نقشی ندارند از معادله خروجی نهایی حذف شده اند. متغیرهای باقیمانده در مدل یعنی X_2, X_3 و X_4 از منحنی دانه بندی خاکها بدست می آیند. مقادیر رمبندگی خاکهای استان گلستان از شمال به جنوب استان با کاهش اندازه دانه ها کم می شود. محققین مختلف رولینز و ویلیامز (Rollins and Williams, 1991)، باسما و تانچر (Basma and Tuncer, 1992)، اوسیف و سولکوف (Osipov and Sokolov, 1995) اثر دانه بندی خاک بر استعداد رمبندگی خاکها را بیان کرده اند.

لذا انتخاب توزیع اندازه ذرات توسط مدل پیشنهادی دقیق و معنی دار می باشد. همچنین درجه اشباع اولیه خاک که بیانگر درصد تخلخل و درصد رطوبت خاک نیز می باشد متغیرهای تعیین کننده ای در تعیین حساسیت رمبندگی خاک می باشند. اهمیت درجه اشباع و رطوبت خاک توسط بسیاری از محققین باسما و تانچر (Basma and Tuncer, 1992)، دریشایر و همکاران (Derbyshire et al., 1995)، پیرا و فردلند (Pereira and Fredlund, 2000)، عزیز و همکاران (Aziz et al.,)

جدول ۵. برازش مدل رگرسیون رتبه‌ای

		Coefficients		
Independent Variable	Value	Std. Error	t value	
x2	-0.7208	0.25	-2.778	
x3	-0.7436	0.213	-3.480	
x4	-0.7258	0.27	-2.609	
x5	0.2607	0.05958	4.375	
x6	0.3538	0.11382	3.108	
Intercepts				
	Value	Std. Error	t value	
1 2	-53.8588	23.9476	-2.2490	
2 3	-51.4717	23.8071	-2.1620	
3 4	-49.8942	23.7652	-2.0995	
Residual Deviance:	102.9935			
AIC:	118.9935			
z test of coefficients				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr (> z)
x2	-0.720804	0.259502	-2.7776	0.0054754 **
x3	-0.743584	0.213656	-3.4803	0.0005009 ***
x4	-0.725791	0.278218	-2.6087	0.0090884 **
x5	0.260675	0.059581	4.3752	1.213e-05 ***
x6	0.353758	0.113823	3.1080	0.0018839 **
1 2	-53.858768	23.947612	-2.2490	0.0245109 *
2 3	-51.471664	23.807146	-2.1620	0.0306162 *
3 4	-49.894217	23.765152	-2.0995	0.0357755 *
Signif. codes	0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1			
x2	x3	x4	x5	x6
0.4863608	0.4754071	0.4839418	1.2978059	1.4244109

جدول ۶. کلاسه‌های پیش بینی شده توسط مدل رگرسیون لجستیک رتبه ای و درصد احتمال آنها در هر کلاس

sample Number	Experimental classes	OLR model				
		Predicted Classes	Y=1	Y=2	Y=3	Y=4
S-M1	4	4	0.98	8.76	24.54	65.59
S-M2	3	4	0.62	5.78	18.52	75.08
S-M3	4	4	0.207	2.01	7.71	90.1
S-M4	4	4	1.1	9.79	26.34	62.73
S-M5	4	4	1.26	10.94	28.1	59.71
S-M6	4	4	0.13	1.31	5.2	93.3
SA1	4	4	0.54	5.08	16.82	77.54
SA2	3	4	1.35	11.65	29.05	57.94
SA3	4	4	0.72	0.66	20.4	72.25
SA4	4	4	1.8	14.9	32.62	50.67
SA5	4	4	5.36	5.17	16.65	77.79
SA6	4	4	0.72	6.67	20.53	72.06
B1	4	4	7.91	40.47	33.8	18.01
B2	4	4	0.2	1.95	7.46	90.39
B3	3	2	13.45	49.46	26.25	10.82
B4	4	4	3.8	26.3	37.54	32.32
B5	4	4	0.37	3.5	12.7	83.34
B6	4	4	2.34	18.44	35.24	44.01

ادامه جدول ۶.

sample Number	Experimental classes	OLR model				
		Predicted Classes	Y=1	Y=2	Y=3	Y=4
AG-E1	4	4	0.43	4.1	14.2	81.26
AG-E2	4	4	0.05	0.47	1.95	97.5
AG-E3	4	4	0.07	0.7	2.94	96.27
AG-E4	4	4	0.67	6.18	19.45	73.69
AG-E5	4	4	0.09	0.92	3.73	95.25
AG-E6	4	4	0.03	23	1.32	98.33
AG1	3	2	20.77	53.33	19.18	6.71
AG2	2	2	11.61	47.3	28.52	12.56
AG3	2	2	11.41	47.02	28.78	12.78
AG4	3	3	5.08	31.79	37.05	26.07
G-C1	2	2	6.66	37.14	35.29	20.89
G-C2	2	2	7.03	38.19	34.8	19.95
G-C3	2	3	5.57	33.62	36.58	24.2
G-C4	3	4	2.45	19.09	35.59	42.85
F1	1	1	45.33	44.7	7.72	2.25
F2	1	1	61.42	33.13	4.27	1.17
F3	1	1	60.48	33.86	4.42	1.21
F4	1	1	67.04	28.65	3.39	0.92
F5	1	1	50.82	41.16	6.39	1.8
F6	1	1	52.99	39.49	5.87	1.64
CH1	1	1	84.26	14.05	1.33	0.35
CH2	1	1	93.56	5.8	0.49	0.12
CH3	1	1	94.94	4.57	0.38	0.1
CH4	1	1	91.57	7.6	0.66	0.17
CH5	1	1	86.64	11.69	1.07	0.28
CH6	1	1	87.19	11.48	1.05	0.27
AL1	2	1	80.77	17.09	1.68	0.44
AL2	2	2	39.18	48.9	9.95	2.96
AL3	2	1	95.36	4.19	0.35	0.09
AL4	3	1	51.33	40.67	6.2	10.75
AL5	2	2	29.29	52.59	13.75	4.35
AL6	3	1	78.81	18.78	1.89	0.5
T1	3	2	4.79	30.6	37.27	27.72
T2	2	3	4.26	28.44	37.52	29.76
T3	2	3	4.59	29.83	37.4	28.17
T4	3	2	14.65	50.55	24.89	9.9
T5	2	2	7.85	40.35	33.67	18.11
T6	2	4	2.15	17.21	34.46	46.16
H1	1	2	30.13	52.34	13.33	4.2
H2	2	2	26.36	53.25	15.36	5
H3	1	2	33.47	51.12	11.79	3.61
H4	2	2	21.9	53.47	18.32	6.3
H5	1	2	10.62	45.8	29.83	13.7
H6	2	2	21.9	53.47	18.31	6.3

۵-۴. ارزیابی صحت مدل پیشنهادی

برای ارزیابی میزان کارایی و صحت مدل پیشنهادی از داده های منابع مختلف (حیدری م ۱۳۶۹؛ رفیعی م، ۱۳۹۰؛ رحمانیان و رضائی، ۱۳۹۳) استفاده شده است. ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی خاکهای لسی مناطق سرخس مشهد و سمنان در مدل پیشنهادی وارد شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه زمان T90% برخی از مناطق نمونه برداری و

آزمون های آزمایشگاهی انجام شده است. خروجی مدل نشان داد که از بین ۷ نمونه خاک مناطق فوق الذکر تنها نمونه خاک SM1 در منطقه سمنان با خطای ناچیزی به جای قرار گیری در کلاس ۲ یعنی خاک با جساسیت نسبتاً شدید در رده شدید (کلاس ۱) قرار گرفته است (جدول ۷). اما سایر نمونه های خاک با احتمال قرار گیری حداقل بیش از ۶۱ درصد در کلاسی مشابه کلاس تجربی قرار می گیرند.

جدول ۷. مقایسه کلاسهای پیش بینی شده و درصد احتمال قرارگیری آنها در هر کلاس و مقایسه آن با نتایج تجربی آنها

location	References	Sample number	Sand %	Silt %	Clay %	Sr %	n %	I _c	T _{90%}	Y _{lab}	Y _(OLR)			
											y=1	y=2	y=3	y=4
Serakhs	Rafiei,2011	Sr1	15	67	18	17.44	38.9	10.3	11	y=1	81.91	16.10	1.56	0.41
Serakhs	Rafiei,2011	Sr2	12.3	71.2	16.5	9.31	35.81	11.7	10.61	y=1	99.16	0.76	0.06	0.01
Serakhs	Rafiei,2011	Sr3	14.2	68.7	17.1	17.53	37.21	8.6	14.7	y=1	89.12	9.76	0.87	0.22
Serakhs	Heidari,1990	Sr4	10.6	73.3	16.15	12.51	39.54	11.81	13.3	y=1	93.77	5.62	0.48	0.12
Mashhad (old silo site)	Heidari,1990	M1	18	78	4	8.93	37	9.3	12.7	y=1	98.86	1.03	0.08	0.02
Semnan	Rahmanian, & Rezaey,2014	SM1	16	77	7	22	46.80	7	56.2	Y=2	47.05	43.59	7.27	2.07
Semnan	Rahmanian, & Rezaey,2014	SM1	15	75	10	32.95	48.1	4.5	78	Y=4	0.27	2.69	9.97	87.05

۵. نتیجه گیری

- ارزیابی صحت مدل پیشنهادی از داده های منابع مختلف نشان داد که از بین ۷ نمونه خاک انتخابی، تنها نمونه خاک SM1 با خطای ناچیزی به جای قرار گیری در کلاس ۲ در رده ۱ قرار گرفته است. اما سایر نمونه های خاک با احتمال قرار گیری حداقل بیش از ۶۱ درصد در کلاسی مشابه کلاس تجربی قرار می گیرند.
- یافته های این تحقیق با توجه به اینکه تعداد داده های مقاله کم می باشد، صرفا ارزش محلی داشته و قابلیت تسری به سایر خاک های رمبند را ندارد.

با توجه به اهمیت کلاس حساسیت رمبندگی خاکهای لسی استان گلستان در برآورد میزان تمرکز فروچاله های شبه کارستی و نشست نامتقارن ساختمانهای مسکونی و ترک خوردن زمین، تعیین کلاس حساسیت رمبندگی آنها اهمیت به سزایی در پیش بینی وقوع خطرات در آینده در این منطقه دارد. با انجام آزمونهای آزمایشگاهی بر روی خاک های لسی استان گلستان شدت، سرعت و در نتیجه کلاس حساسیت رمبندگی آنها به روش تجربی تعیین گردید. سپس با استفاده از داده های منحنی دانه بندی این خاکها، تخلخل و درصد اشباع اولیه آنها، کلاس حساسیت آنها در مقیاس ناحیه ای با بکارگیری روش رگرسیون لجستیک رتبه ای در استان گلستان ارزیابی و نتایج ذیل بدست آمد:

- از بین پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی فقط داده های منحنی دانه بندی، تخلخل، درصد رطوبت و درجه اشباع خاکها برای ورودی مدل کفایت می کنند.
- از بین ۶۲ نمونه خاک آزمایش شده، بیش از ۷۲/۵ درصد کلاسهای پیش بینی شده توسط این مدل، با کلاسهای تجربی تعیین شده مطابقت دارند.

منابع

- حافظی مقدس، ن.، نیکودل، م.ر.، بهرامی، ک.، ۱۳۹۰. ارزیابی قابلیت رمبندگی خاکهای لسی حوزه قرناوه در شمال کلاله، استان گلستان. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد چهارم، شماره ۱ و ۲.
- حیدری، م.، ۱۳۶۹. ساخت دستگاه تحکیم با فشار جانبی کنترل شده و بررسی پدیده رمبندگی در خاکها. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه.
- رحمانیان، س.، رضائی، ف.، ۱۳۹۳. اصلاح خاکهای فروریزشی با استفاده از روش تزریق (مطالعه موردی: ایستگاه راه آهن سمنان). مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۲.
- رفیعی، م.، ۱۳۹۰. ارزیابی فرسایش و فرونشست زمین در منطقه خانگیران، خراسان رضوی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده علوم پایه.
- لشکری پور، غ.، اتابای، ح.، رضایی، ح.، ۱۳۹۶. پهنه بندی خطر فروچاله در خاک های شمال شرق کلاله، استان گلستان با استفاده از روش آماری دو متغیره (روش ارزش اطلاعاتی) و GIS. چهارمین کنفرانس ملی دستاوردهای اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.

ASTM D-5333., ۲۰۰۳. Standard test method for measurement of collapse potential of soils. Annual book of ASTM Standards: 04 -1197-1199.

- Aziz, A.A., Hj-Ali, F., Heng, C.F., Mohammed, T.A., Huat, B.K.H., 2006. Collapsibility and volume change behavior of unsaturated residual soils. Am J Environ Sci: 2(4) 161-166.
- Basma, AA., Tuncer, ER., 1992. Evaluation and control of collapsing soils. J Geotech Eng: 118(10) 1491-1504.
- Derbyshire, E., Dijkstra, T., Smalley, I., 1995. Genesis and properties of collapsible soils. Mathematical and physical sciences: NATO ASI Series C. Kluwer, Dordrecht.
- Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., Skowronek, A., 2009. Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran. Quaternary International: 198 (1-2) 220-233.
- Guan, WZ., 1983. Preliminary study on factors affecting the sensitivity of self-weight collapsible loess and its discriminant index. Site Investing Sci Technol: 4, 32-35 (in Chinese).
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S., 2000. Applied Logistic Regression. Second edition, John Wiley and Sons Inc, New York: 373 p.
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Alinejad, M., 2018. An application of different summary statistics for modelling piping collapses and gully headcuts to evaluate their geomorphological interactions in Golestan Province, Iran. Catena: 171, 613-621.
- Hou, X., Vanapalli, S. K., Li, T., 2019. Wetting-induced collapse behavior associated with infiltration: A case study. Engineering Geology: 258, 105146.
[https:// doi:10.1016/j.enggeo.2019.105146](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105146).
- Jennings, J.E., Knight, K., 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. Proceedings of the 6th African conference on soil mechanics and foundation engineering: 99-105.
- Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H. R., Bernatek-Jakiel, A., Campetella, G., Ownegh, M., 2019. Evaluation of factors affecting gully headcut location using summary statistics and the maximum entropy model: Golestan Province, NE Iran. Science of Environment : 04,306. doi:10.1016/j.scitotenv.
- Kim, D., Kang, S.S., 2013. Engineering properties of compacted Losses as construction materials. KSCE J Civ Eng: 17(2), 335-341.
- Lutenegger, AJ., 2012. Collapse sensitivity of midcontinent and lower Mississippi Valley loess. Geocongress: 225, 880-889.
- Osipov, VI., Sokolov, VN., 1995. Factors and mechanism of loess collapsibility. Genesis and properties of collapsible soils: NATO ASI Series. 49-63.

-
- Pereira, HF., Fredlund, DG., 2000. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil. *J Geotech Geoenviron Eng*: 126 (10), 907–916.
- Rezaei, H., Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M., 2011. Engineering Geology Criteria for Evaluation and Classification of Loess in Golestan Province. *J. Basic. Appl. Sci. Res*: 1(12), 2979-2986.
- Rollins, KM., Williams, L., 1991. Collapsible soil hazard mapping for Cedar City. *Proceedings of the 27th symposium on engineering geology and geotechnical engineering*, Logan, Utah: 31, 1–16.
- Salehi, T., Shokrian, M., Modirrousta, A., Khodabandeh, M., Heidari, M., 2015. Estimation of the collapse potential of loess soils in Golestan Province using neural networks and neuro-fuzzy systems. *Arabian Journal of Geosciences*: 8 (11), 9557–9567.
- Smalley, I., Marković, S. B., Svirčev, Z., 2011. Loess is [almost totally formed by] the accumulation of dust. *Quaternary International*: 240 (1-2) 4–11.
- Xie, W. L., Li, P., Vanapalli, S. K., Wang, J. D., 2018. Prediction of the wetting-induced collapse behavior using the soil-water characteristic curve. *Journal of Asian Earth Sciences*” 151, 259–268.
- Zalaghaie, S., Heidari, M., Nikudel, M.R., 2022. Evaluation of collapse sensitivity of loess soils and its effect on the distribution pattern of pseudokarst sinkholes at the regional scale (case study: Golestan Province, northeastern Iran). *Nat Hazards*: 112, 1883–1902. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05203-9>
- Zhang, Y., Hu1, Z., Xue, Z., 2018. A new method of assessing the collapse sensitivity of loess. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1372-9>.