

جزوه روشهای محاسبه نشست سالوده های سطحی

گردآورنده: علیرضا خسروانی مقدم (مدیروبلاگ تخصصی مهندسی ژئوتکنیک)

E-mail: alireza479@yahoo.com

WEB: www.khosrovani.org

(نشر این جزوه با ذکر منبع بلامانع است)

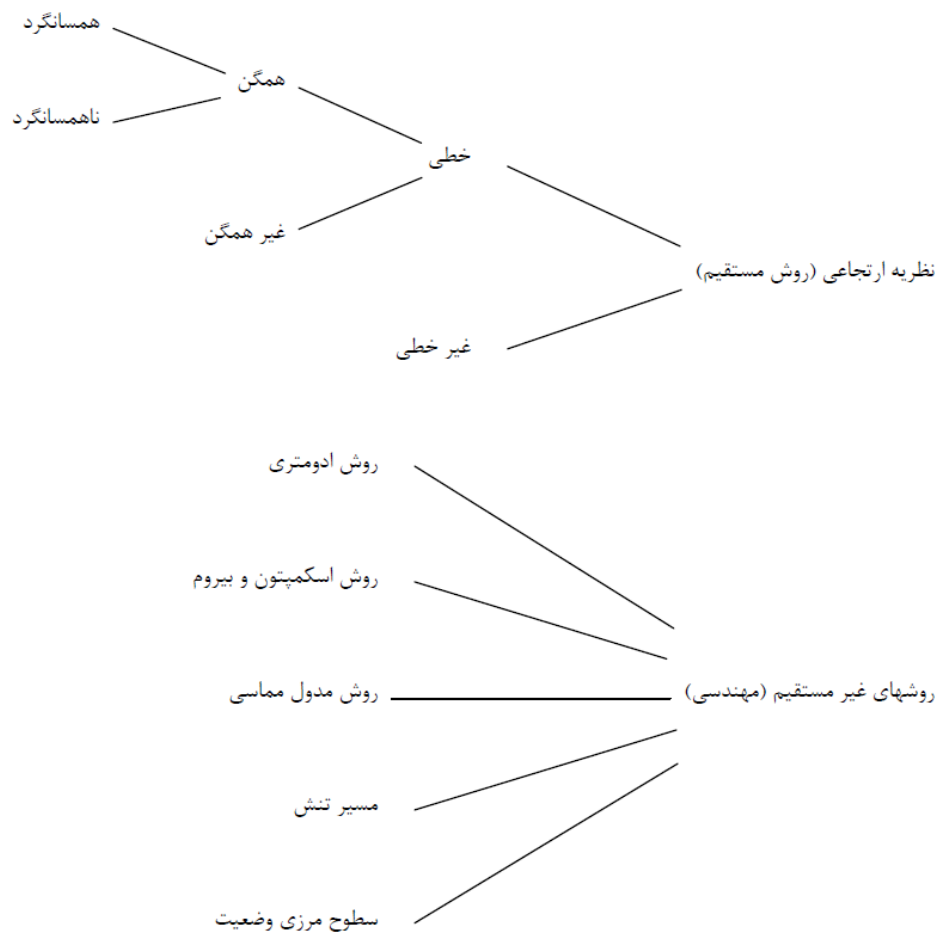
روشهای محاسبه نشست شالوده های سطحی

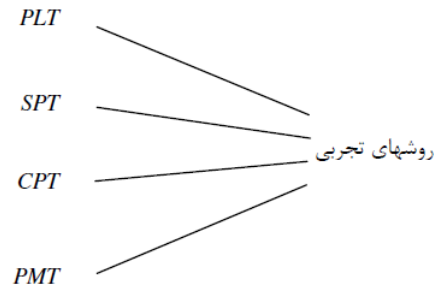
- ۱ استفاده از نظریه ارتجاعی (روش مستقیم)
 - ۱-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای همگن و همسان
 - ۱-۱-۱ محاسبه نشست برای بارگذاری متمرکز
 - ۱-۱-۲ محاسبه نشست برای بارگذاری خطی
 - ۱-۱-۳ محاسبه نشست برای بارگذاری نواری
 - ۱-۱-۴ محاسبه نشست برای بارگذاری دایروی
 - ۱-۱-۵ محاسبه نشست برای بارگذاری حلقوی
 - ۱-۱-۶ محاسبه نشست برای بارگذاری مستطیلی
 - ۲-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای ناهمگن
 - ۱-۲-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای ناهمگن ذاتی
 - ۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن با لایه بندی متفاوت
 - ۱-۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن دو لایه
 - ۲-۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن سه لایه
 - ۳-۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن چند لایه
- ۳-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای ناهمسان متقاطع
 - ۵-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای غیر خطی
- ۲ استفاده از روش های غیر مستقیم (مهندسی)
 - ۱-۲ محاسبه نشست به کمک روش ادمتری
 - ۲-۲ محاسبه نشست به کمک روش اسکمپتون و بیروم
 - ۳-۲ محاسبه نشست به کمک روش مدول مماسی
 - ۴-۲ محاسبه نشست به کمک روش مسیر تنش
 - ۵-۲ محاسبه نشست به کمک روش سطوح مرزی وضعیت

روشهایی را که برای محاسبه نشست شالوده های سطحی مورد استفاده قرار می گیرد می توان در سه دسته کلی جای داد (شکل ۱). گروه اول شامل روشهای دقیق تحلیلی است و در آن از تئوری الاستیسیته استفاده می گردد که شامل ارضای معادله تعادل، معادله رفتاری و شرایط مرزی می باشد.

دسته دوم که کاربرد فراوانی در محاسبات مهندسی دارد تنها از تئوری الاستیسیته برای محاسبه اضافه تنش ایجاد شده در توده خاک بر اثر بارگذاری استفاده می نماید و رابطه میان تنش و کرنش برای مراحل بعدی محاسبات از نتایج آزمونهای آزمایشگاهی حاصل می گردد. به همین دلیل این دسته از روشها در مقایسه با دسته اول، روشهای غیر مستقیم نامیده می شوند در این دسته روشها فرض می گردد که تنشهای ایجاد شده در اسکلت خاک مستقل از خواص مکانیکی و رفتاری این مصالح می باشد که در نتیجه قادر به لحاظ کردن رفتار غیر خطی تنش-کرنش ایجاد شده در شرایط واقعی اسکلت خاک می باشند و نتایج حاصله به مقادیر اندازه گیری شده نزدیک می باشد.

دسته سوم روشهای تجربی را شامل می شود که عمدتاً از برون یابی نتایج بارگذاری یا آزمایش های دیگر نظیر آزمایش نفوذ استاندارد و ... حاصل شده و بیشتر برای خاکهای غیر چسبنده مورد استفاده قرار می گیرند.





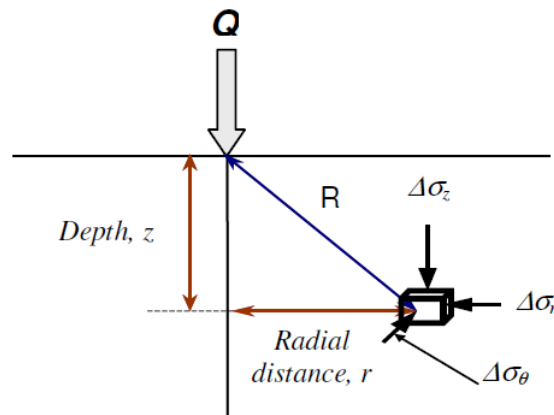
شکل ۱ روشهای مختلف محاسبه نشست شالوده های سطحی

۱ استفاده از نظریه ارتجاعی (روش مستقیم):

۱-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای همگن و همسان:

۱-۱-۱ محاسبه نشست برای بارگذاری متمرکز:

با کمک گرفتن از معادلات بوسینس می توان جابه جایی قائم سطح یک نیم فضای بینهایت را برای انواع مختلف بارگذاری بدست آورد.



شکل ۲ بار نقطه ای Q و تنش های ایجاد شده در المانی به فاصله R

برای محاسبه نشست ارتجاعی ناشی از بار متمرکز (شکل ۲)، تغییر شکل نسبی در عمق z در مختصات استوانه ای به صورت زیر داده می شود:

$$\left[\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \right] \quad (1)$$

که در آن E ضریب ارتجاعی خاک می باشد. روابط لازم برای σ_r ، σ_θ و σ_z از نظریه ارتجاعی بدست می آیند و برابرند با:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} \\ \sigma_r &= \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{3zr^2}{R^5} - \frac{1-2\nu}{R(R+z)} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{Q}{2\pi} (1-2\nu) \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{z}{R^3} \right]\end{aligned}\quad (2)$$

با جایگذاری این روابط برای σ_z و σ_r و σ_θ در رابطه ۱ داریم:

$$\varepsilon_z = \frac{Q}{2\pi E} \left[\frac{3(1+\nu)r^2z}{(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{3+\nu(1-2\nu)z}{(r^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3)$$

با انتگرال گیری از معادله بالا، نشست در عمق z بدست می آید:

$$S_e = \int \varepsilon_z \cdot dz = \frac{Q}{2\pi E} \left[\frac{(1+\nu)z^2}{(r^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{2(1-2\nu^2)}{(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (4)$$

نشست در سطح زمین با جایگذاری $z=0$ در معادله بالا حاصل می شود:

$$S_e(\text{surface}) = \frac{Q}{\pi E r} (1-\nu^2) \quad (5)$$

میندلین رابطه زیر را برای یک بار نقطه ای قائم که به اندازه c پایین تر از سطح یک نیم فضای نیم بینهایت الاستیک وارد

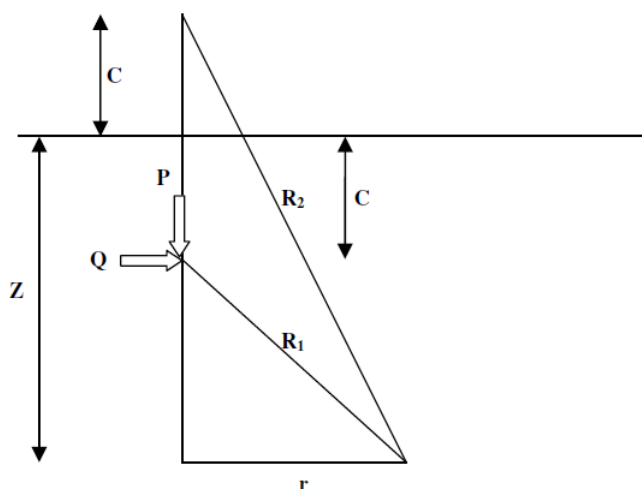
می شود (شکل ۳) ارائه داد:

$$S = \frac{P}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (6)$$

در رابطه بالا R_1 و R_2 به ترتیب برابرند با:

$$R_1 = (r^2 + (z-c)^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$R_2 = (r^2 + (z+c)^2)^{\frac{1}{2}}$$



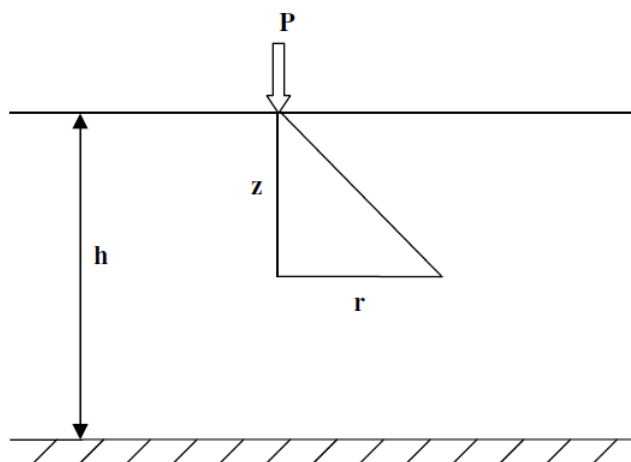
شکل ۳ بار نقطه ای افقی و قائم به اندازه c پایین تر از سطح یک نیم فضای نیم بینهایت

برای بار نقطه ای افقی که به اندازه c پایین تر از سطح یک نیم فضای نیم بینهایت الاستیک وارد می شود (شکل ۳) میندلین رابطه زیر را ارائه داد:

$$S = \frac{Qx}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{z-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z-c)}{R_2^3} - \frac{6cz(z+c)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+c)} \right] \quad (7)$$

برای بار نقطه ای قائم که در سطح یک نیم فضای الاستیک متکی بر سنگ بستر صلب وارد می شود (شکل ۴) تیلور رابطه زیر را ارائه داد:

$$S = \frac{PI}{2\pi h E} \quad (8)$$



شکل ۴ بار نقطه ای قائم در سطح یک نیم فضای الاستیک متکی بر سنگ بستر صلب

که در آن I تابعی است از ضریب پواسون، ν و نسبت r/h و به کمک جدول ۱ بدست می آید:

جدول ۱ محاسبه ضریب تأثیر I

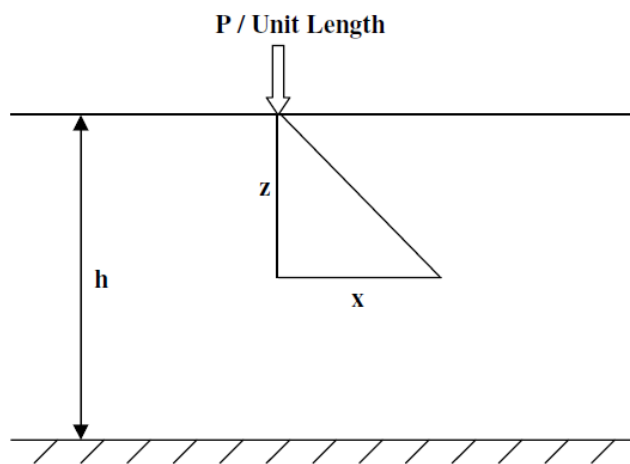
r/h	ν	0	0.2	0.4	0.5
0.05		37.580	35.921	31.052	27.351
0.1		17.586	16.728	14.260	13.360
0.2		7.624	7.162	5.897	4.914
0.3		4.327	4.016	3.154	2.480
0.4		2.720	2.478	1.827	1.320
0.5		1.792	1.599	1.092	0.699
0.6		1.212	1.048	0.635	0.290
0.7		0.823	0.690	0.352	0.051
0.8		0.560	0.450	0.168	-0.079
0.9		0.373	0.286	0.053	-0.160
1.0		0.250	0.182	-0.011	-0.183
1.25		0.080	0.031	-0.085	-0.194
1.5		0.013	-0.002	-0.077	-0.156
1.75		-0.007	-0.007	-0.048	-0.123
2.0		-0.012	-0.011	-0.039	-0.083
2.5		-0.004	-0.017	-0.025	-0.036
3.0		-0.003	0.001	-0.008	-0.025
3.5		-0.003	0.000	-0.004	-0.018
4.0		-0.001	0.000	-0.003	-0.012
6.0		-0.000	-0.000	-0.001	-0.002
8.0		-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
10.0		-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

۲-۱-۱ محاسبه نشست برای بارگذاری خطی:

برای محاسبه نشست حاصل از یک بار خطی قائم که در سطح یک نیم فضای الاستیک متکی بر سنگ بستر صلب وارد می شود

پولوس رابطه زیر را ارائه داد:

$$S = \frac{P}{\pi E} I \tag{9}$$



شکل ۵: بار خطی قائم در سطح یک نیم فضای الاستیک متکی بر سنگ بستر صلب

که در آن I تابعی است از ضریب پواسون، ν و نسبت x/h و به کمک جدول ۲ بدست می آید:

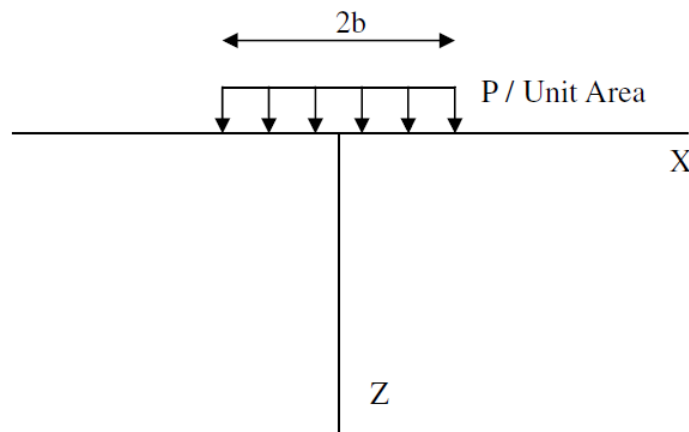
جدول ۲ محاسبه ضریب تأثیر I

x/h	ν	0	0.2	0.4	0.5
0.1		3.756	3.466	2.633	1.926
0.2		2.461	2.222	1.558	0.973
0.3		1.730	1.533	0.964	0.458
0.4		1.244	1.069	0.583	0.132
0.5		0.896	0.749	0.324	-0.079
0.6		0.643	0.511	0.145	-0.217
0.7		0.453	0.347	0.045	-0.299
0.8		0.313	0.218	-0.057	-0.344
0.9		0.212	0.141	-0.101	-0.358
1.0		0.126	0.059	-0.139	-0.359
1.25		0.023	-0.006	-0.146	-0.315
1.5		-0.012	-0.024	-0.112	-0.254
1.75		-0.023	-0.023	-0.086	-0.198
2.0		-0.017	-0.015	-0.071	-0.134
2.5		-0.010	-0.009	-0.034	-0.085
3.0		-0.008	-0.001	-0.014	-0.057
4.0		-0.002	-0.000	-0.007	-0.025
6.0		-0.000	-0.000	-0.002	-0.004
8.0		-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

۳-۱-۱ محاسبه نشست برای بارگذاری نواری:

نشست سطح یک بارگذاری نواری انعطاف پذیر (شکل ۶) نسبت به مرکز نوار از رابطه زیر بدست می آید

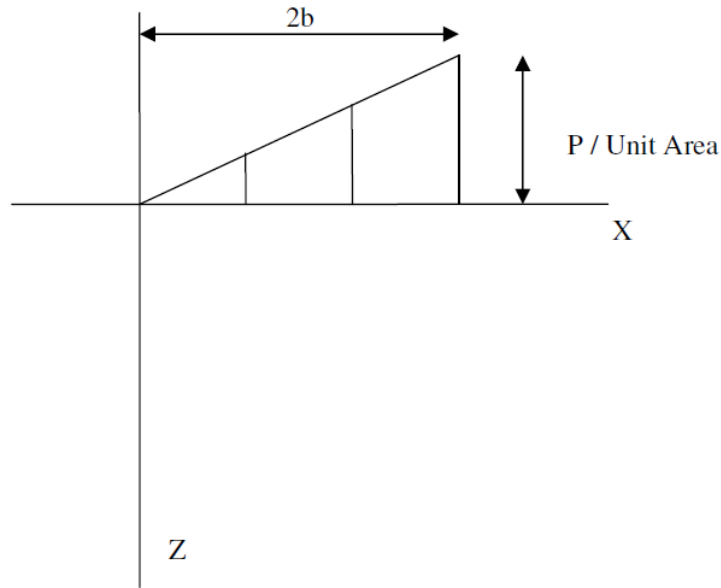
$$S(x,0) - S(0,0) = \frac{2P(1-\nu^2)}{\pi E} [(x-b) \text{Ln}|x-b| - (x+b) \text{Ln}|x+b| + 2b \text{Ln}(b)] \quad (۱۰)$$



شکل ۶ بارگذاری نواری یکنواخت قائم در یک محیط نیم بینهایت

همچنین نشست نسبی یک بارگذاری نواری با بار افزایش یابنده خطی (شکل ۷) نسبت به نقطه $x=0$ را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد

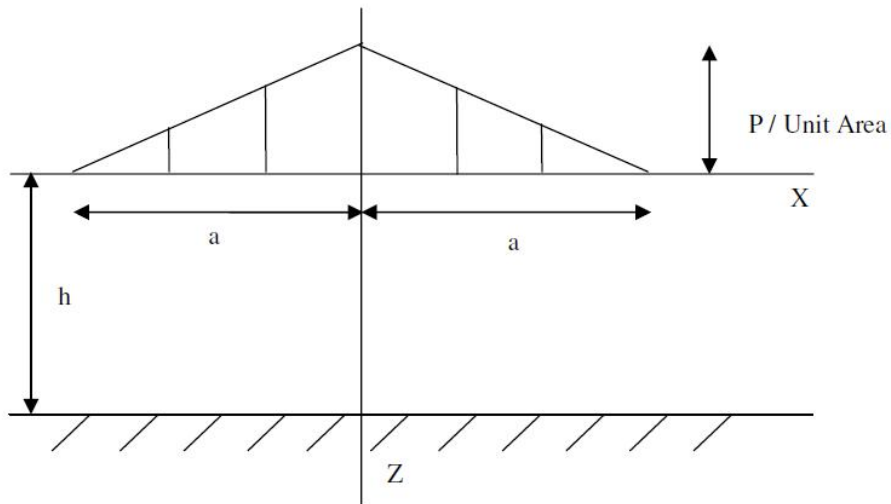
$$S(x,0) - S(0,0) = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi b E} \left[2b^2 \ln 2b - \frac{x^2}{2} \ln x + \left(\frac{x^2}{2} - 2b^2 \right) \ln |2b - x| + bx \right] \quad (11)$$



شکل ۷ بارگذاری نواری با بار افزایش یابنده خطی

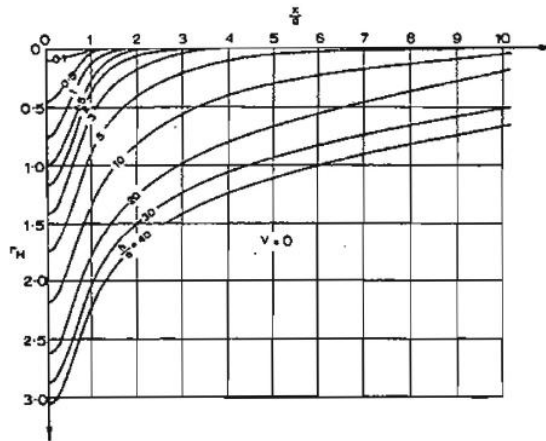
برای محاسبه نشست یک بارگذاری مثلی در یک محیط نیم بینهایت محدود به سنگ بستر (شکل ۸) گیروود رابطه زیر را ارائه داد:

$$S = \frac{pa}{E} r_H \quad (12)$$

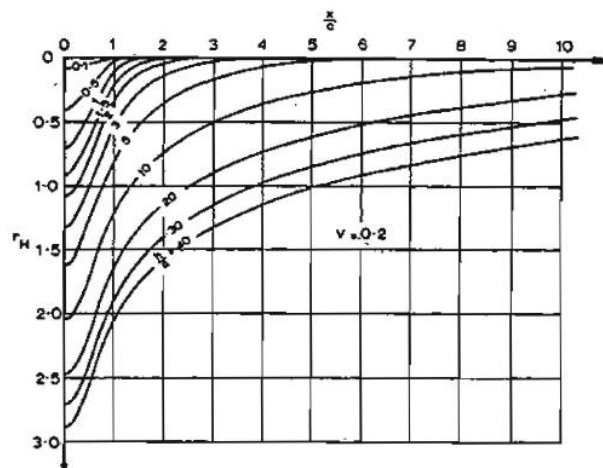


شکل ۸۰ بارگذاری مثلثی در یک محیط نیم بینهایت محدود به سنگ بستر

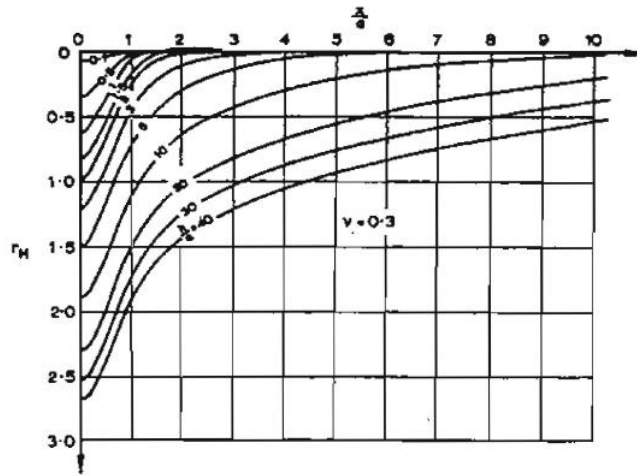
مقادیر r_H به ازای مقادیر ضریب پواسون مختلف در نمودارهای ۹ الف تا ه آمده است.



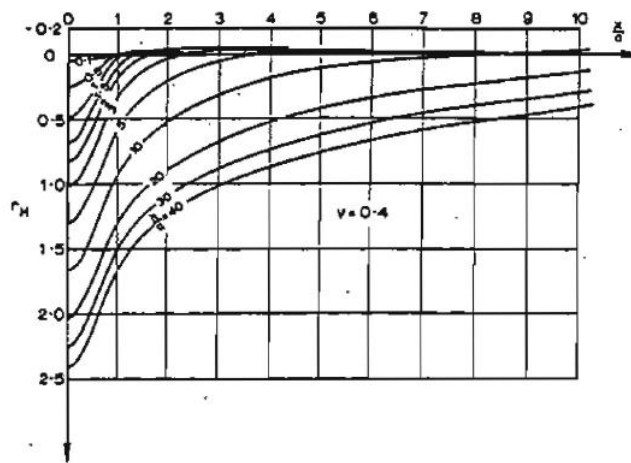
(الف)



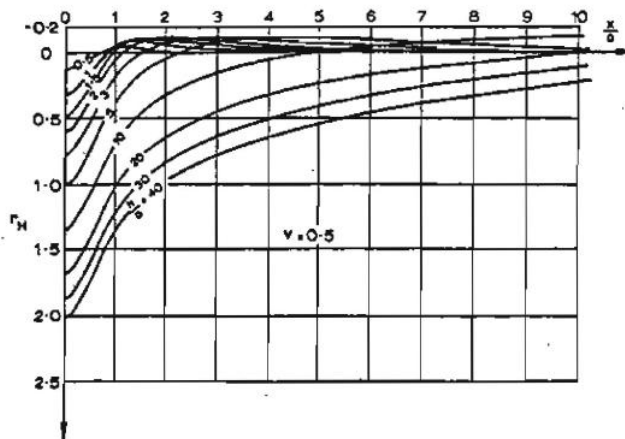
(ب)



(الف)



(ب)

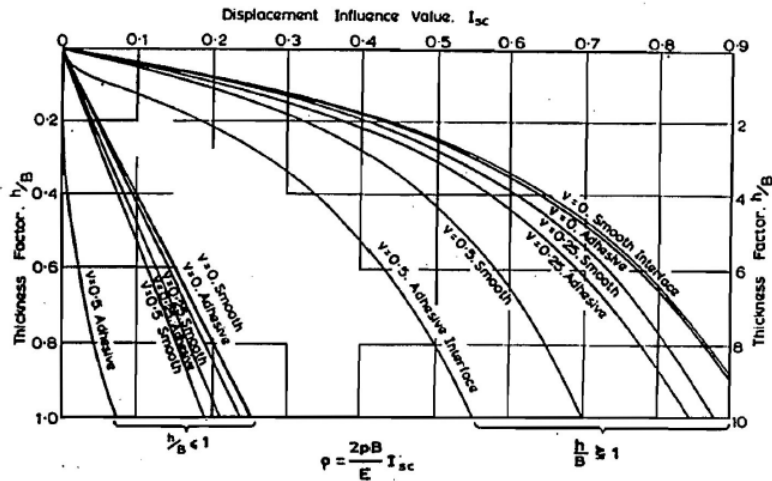


(ج)

شکل ۹ ضریب جابه جایی برای r_H مقادیر الف) $v=0$ ب) $v=0.2$ ج) $v=0.3$ د) $v=0.4$ ه) $v=0.5$

یوشیتا و مایرهوف ضرایب تأثیر زیر را برای نشست لبه یک شالوده نواری انعطاف پذیر مستقر بر محیط محدود به سنگ بستر صلب برای دو حالت شالوده صاف و زیر ارائه دادند. رابطه محاسبه نشست در این روش به صورت زیر است:

$$S = \frac{2pB}{E} I_{sc} \quad (13)$$

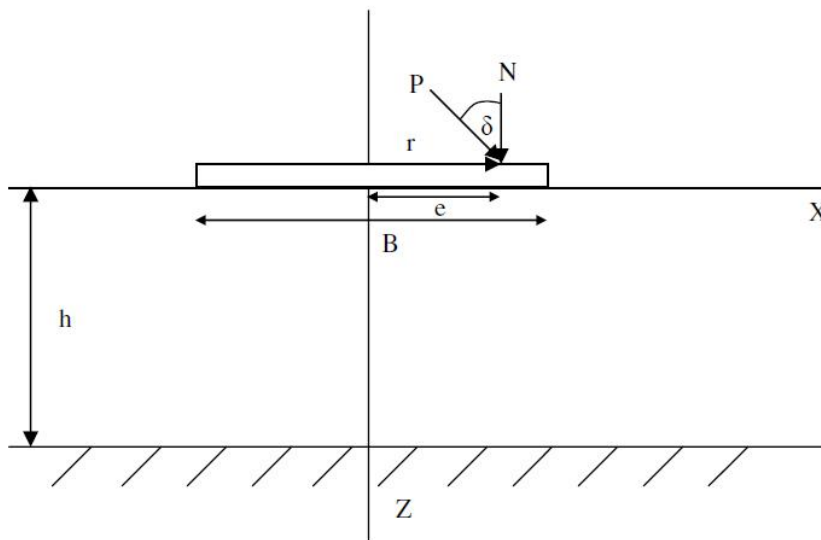


شکل ۱۰ ضریب نشست شالوده لبه شالوده نواری انعطاف پذیر

برای یک بارگذاری نواری نامحدود صلب در یک محیط محدود به سنگ بستر (شکل ۱۱) میلوویک و همکاران رابطه زیر را ارائه دادند:

$$S = \frac{P}{E} \omega_o \quad (14)$$

$$\omega_o = \omega_{ON} \cos \delta \quad \text{که در آن:}$$



شکل ۱۱ بارگذاری نواری نامحدود صلب در یک محیط محدود به سنگ بستر

مقادیر w_{ON} را می توان به کمک جدول زیر بدست آورد.

جدول ۳ مقادیر ضریب w_{ON} به ازای مقادیر ضریب پواسون مختلف

	$\frac{H}{B}$	ν_{OT}	w_{ON}	w_{CM}
$\nu=0.005$	1.0	1.2346	0.7900	2.8185
	2.0	1.6164	1.1959	2.9272
	3.0	1.9778	1.5015	3.1253
$\nu=0.300$	1.0	1.4607	0.6684	2.7698
	2.0	1.8527	1.0685	3.0127
	3.0	2.2334	1.3523	3.1900
$\nu=0.450$	1.0	1.4908	0.4170	2.2435
	2.0	1.8888	0.7618	2.6090
	3.0	2.2246	0.9940	2.7486

۴-۱-۱ محاسبه نشست برای بارگذاری دایروی:

نشست ارتجاعی خاک تحت اثر بار دایره ای یکنواخت را با همان روشی که برای بار متمرکز شرح داده شد می توان محاسبه

کرد که نشست مرکز بار برابر می شود با:

$$S = \frac{2pa(1-\nu^2)}{E} \left(\sqrt{1+(z/a)^2} - z/a \right) \left[1 + \frac{z/a}{2(1-\nu)\sqrt{1+(z/a)^2}} \right] \quad (15)$$

برای مرکز بار در سطح زمین داریم:

$$S_e(\text{surface, center}) = \frac{2pa(1-v^2)}{E} \quad (16)$$

که در آن $B=2b$ قطر سطح بارگذاری شده می باشد. نشست لبه های سطح بارگذاری برابر است با:

$$S_e(\text{surface, edge}) = (1.27)(2) \frac{pa(1-v^2)}{E} = \frac{2.54pa(1-v^2)}{E} \quad (17)$$

مقدار متوسط نشست در سطح زمین برابر است با

$$S_e(\text{surface, average}) = 0.85S_e(\text{surface, center}) \quad (18)$$

آلوین و الی رابطه زیر را برای نشست ناحیه بارگذاری شده دایره ای در یک نیم فضای نیم بینهایت ارائه دادند:

$$S = p \frac{1+v}{E} a [(z/a)A + (1-v)B] \quad (19)$$

که در آن ضرایب A و B به کمک جدول ۴ و ۵ بدست می آیند.

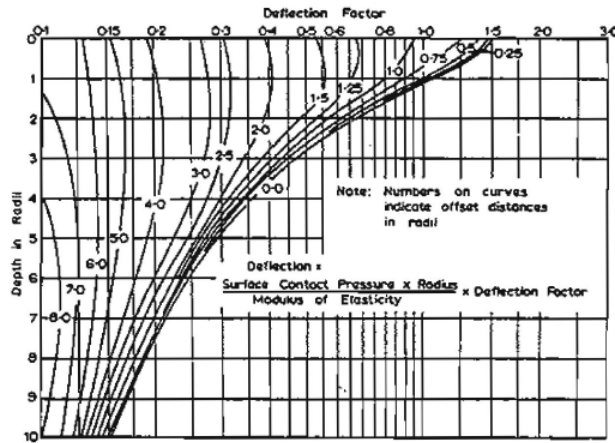
جدول ۴ مقادیر ضریب A بر حسب نسبت های هندسی

r/a z/a	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	.99050	.89748	.88679	.86126	.78797	.43015	.09645	.02787	.00856	.00211	.00084	.00042						
0.2	.80388	.79824	.77884	.73483	.63014	.38269	.15433	.05251	.01680	.00419	.00167	.00083	.00048	.00030	.00020			
0.3	.71265	.70518	.68316	.62690	.52081	.34375	.17964	.07199	.02440	.00622	.00250							
0.4	.62861	.62015	.59241	.53767	.44529	.31048	.18709	.08593	.03118									
0.5	.55279	.54403	.51622	.46448	.38390	.28156	.18556	.09499	.03701	.01013	.00407	.00209	.00118	.00071	.00053	.00025	.00014	.00009
0.6	.48550	.47691	.45078	.40427	.33676	.25588	.17952	.10010										
0.7	.42654	.41874	.39491	.35428	.29833	.21727	.17124	.10228	.04558									
0.8	.37531	.36832	.34729	.31243	.26581	.21297	.16206	.10236										
0.9	.33104	.32492	.30669	.27707	.23832	.19488	.15253	.10094										
1	.29289	.28763	.27005	.24697	.21468	.17868	.14329	.09849	.05385	.01742	.00761	.00393	.00226	.00143	.00097	.00050	.00029	.00018
1.2	.25178	.24795	.23162	.20990	.17626	.15101	.12570	.09192	.05260	.01935	.00871	.00459	.00269	.00171	.00115			
1.5	.16795	.16552	.15877	.14804	.13456	.11892	.10296	.08048	.05116	.02142	.01035	.00548	.00325	.00210	.00141	.00073	.00043	.00027
2	.10557	.10453	.10140	.09647	.09011	.08269	.07471	.06275	.04496	.02221	.01160	.00659	.00398	.00264	.00189	.00094	.00056	.00036
2.5	.07152	.07088	.06947	.06698	.06373	.05974	.05555	.04880	.03787	.02143	.01221	.00732	.00463	.00308	.00214	.00115	.00068	.00043
3	.05132	.05101	.05022	.04886	.04707	.04487	.04241	.03839	.03150	.01980	.01220	.00770	.00505	.00346	.00242	.00132	.00079	.00051
4	.02986	.02976	.02907	.02802	.02832	.02749	.02651	.02490	.02193	.01592	.01109	.00768	.00536	.00384	.00282	.00160	.00099	.00065
5	.01942	.01938				.01835			.01573	.01249	.00949	.00708	.00527	.00394	.00298	.00179	.00113	.00075
6	.01361					.01307			.01164	.00983	.00795	.00628	.00492	.00384	.00299	.00188	.00124	.00084
7	.01005					.00976			.00894	.00784	.00661	.00543	.00445	.00360	.00291	.00193	.00130	.00091
8	.00772					.00753			.00703	.00635	.00554	.00472	.00398	.00332	.00276	.00189	.00134	.00094
9	.00612					.00600			.00566	.00520	.00466	.00409	.00353	.00301	.00256	.00184	.00133	.00096
10									.00477	.00465	.00438	.00397	.00352	.00326	.00273	.00241		

جدول ۵ مقادیر ضریب B بر حسب نسبت های هندسی

r/a z/a	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	.09852	.10140	.11138	.13424	.18796	.05388	-.07899	-.02672	-.00845	-.00210	-.00084	-.00042						
0.2	.18457	.19306	.20772	.23524	.25983	.08513	-.07759	-.04444	-.01593	-.00412	-.00166	-.00083	-.00024	-.00015	-.00010			
0.3	.26362	.26787	.28018	.29483	.27257	.10757	-.04316	-.04999	-.02166	-.00599	-.00245							
0.4	.32016	.32289	.32748	.32273	.26925	.12404	-.00766	-.04535	-.02522									
0.5	.35777	.35752	.35323	.33106	.26236	.13591	.02165	-.05455	-.02651	-.00991	-.00388	-.00199	-.00116	-.00073	-.00049	-.00025	-.00014	-.00009
0.6	.37831	.37531	.36308	.32822	.25411	.14440	.04457	-.02101										
0.7	.38487	.37962	.36072	.31929	.24638	.14986	.06209	-.00702	-.02329									
0.8	.38091	.37408	.35135	.30699	.23779	.15292	.07530	.00614										
0.9	.36962	.36275	.33734	.29299	.22891	.15404	.08507	.01795										
1	.35355	.34533	.32075	.27819	.21978	.15355	.09210	.02814	-.01005	-.01115	-.00608	-.00544	-.00210	-.00135	-.00092	-.00048	-.00028	-.00018
1.2	.31485	.30730	.28481	.24836	.20113	.14915	.10002	.04378	.00023	-.00995	-.00632	-.00578	-.00236	-.00156	-.00107			
1.5	.25602	.25025	.23338	.20694	.17368	.13732	.10193	.05745	.01385	-.00669	-.00600	-.00401	-.00265	-.00181	-.00126	-.00068	-.00040	-.00026
2	.17989	.18144	.16644	.15198	.13375	.11331	.09254	.06371	.02836	.00028	-.00410	-.00371	-.00278	-.00202	-.00148	-.00084	-.00050	-.00033
2.5	.12807	.12633	.12126	.11327	.10298	.09130	.07869	.06022	.03429	.00661	-.00130	-.00271	-.00250	-.00201	-.00156	-.00094	-.00059	-.00039
3	.09487	.09394	.09099	.08635	.08033	.07325	.06531	.05384	.03511	.01112	.00157	-.00154	-.00192	-.00179	-.00131	-.00089	-.00065	-.00046
4	.05707	.05666	.05562	.05383	.05145	.04773	.04532	.03995	.03066	.01512	.00595	.00185	-.00029	-.00094	-.00109	-.00084	-.00068	-.00050
5	.03772	.03760				.03584			.02474	.01522	.00810	.00371	.00132	.00013	-.00043	-.00070	-.00061	-.00049
6	.02666					.02468			.01968	.01380	.00867	.00496	.00254	.00110	.00028	-.00037	-.00047	-.00045
7	.01980					.01868			.01577	.01204	.00842	.00547	.00332	.00185	.00093	-.00002	-.00029	-.00037
8	.01526					.01459			.01279	.01034	.00779	.00554	.00372	.00236	.00141	.00035	-.00008	-.00025
9	.01212					.01170			.01054	.00888	.00705	.00533	.00386	.00265	.00178	.00066	.00012	-.00012
10									.00924	.00879	.00764	.00631	.00501	.00382	.00281	.00199		

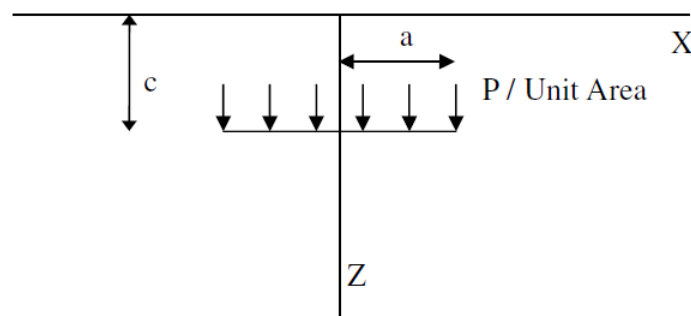
برای حالت $\nu=0.5$ برای محاسبه نشست می توان از نمودار ۱۲ که توسط فستر و آلوین ارائه گردیده است استفاده کرد:



شکل ۱۲ نشست شالوده مدور با بارگذاری یکنواخت برای $\nu=0.5$

برای شالوده ای که به اندازه c پایین تر از سطح یک نیم فضای نیم بینهایت قرار دارد (شکل ۱۳) نیشیدا رابطه زیر را ارائه داد:

$$S = \frac{pa}{E} I \quad (20)$$



شکل ۱۳ شالوده مدور انعطاف پذیر به اندازه c پایین تر از سطح یک نیم فضای نیم بینهایت

که ضریب تأثیر نشست، I را می توان به کمک جدول زیر بدست آورد.

جدول ۶ تغییرات ضریب تأثیر نشست به ازای نسبت های هندسی و ضریب پواسون مختلف

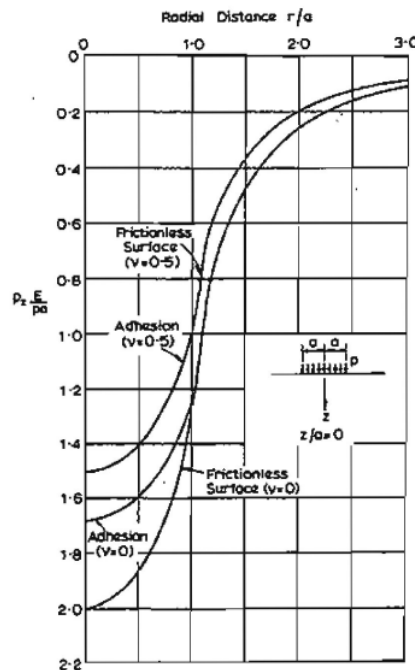
a/a	I_o (centre)			I_e (edge)		
	ν	0.50	0.25	0.00	0.50	0.25
0.00	1.500	1.875	2.000	0.955	1.194	1.273
3.50	0.908	0.995	0.909			
5.00	0.862	0.947	0.862	0.586	0.640	0.585
100	0.750	0.833	0.750	0.478	0.530	0.478
1000	0.750	0.833	0.750	0.478	0.530	0.478

برای نشست سطح یک ناحیه بارگذاری شده مدور صلب که به صورت یکنواخت و قائم بارگذاری شده است شیفت من رابطه زیر را ارائه داد:

$$S = \frac{pa(1+\nu)}{E} \left[4(1-\nu)E(r/a) - \frac{(1-2\nu)^2}{1-\nu} \left(\sqrt{1-(r/a)^2} \right) \right] \quad (r/a < 1) \quad (21)$$

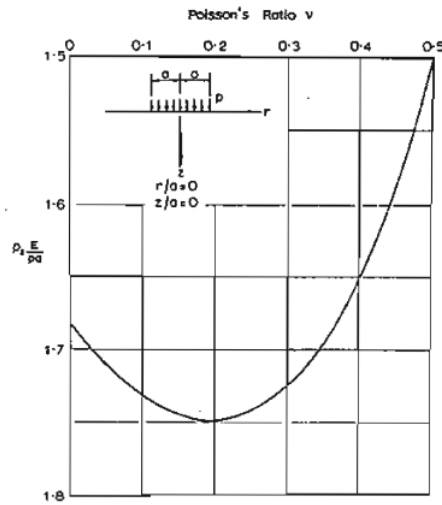
$$S = \frac{4p(1-\nu^2)r}{\pi E} \left[E(a/r) - \frac{(r^2-a^2)}{r^2} K(a/r) \right] \quad (r/a > 1) \quad (22)$$

که در آنها $K(k)$ انتگرال بیضوی از نوع اول و $E(k)$ انتگرال بیضوی از نوع دوم می باشد. پروفیل تغییر شکل قائم برای دو حالت شالوده صاف و زیر در شکل ۱۴ آمده است.



شکل ۱۴ پروفیل تغییر شکل قائم سطح یک بارگذاری مدور

تأثیر ν بر روی جابه جایی سطحی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. برای $\nu=0$ اصطکاک شالوده تأثیری بر روی نشست محاسبه شده ندارد.



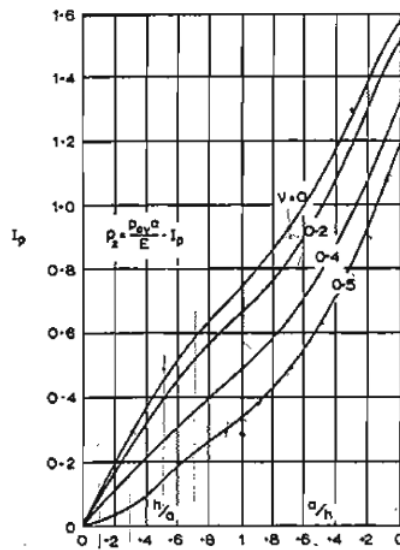
شکل ۱۵. تأثیر ضریب پواسون بر نشست سطحی شالوده مدور

رابطه دیگری توسط پولوس و دیویس به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$S = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \frac{P_{av} a}{E} \quad (23)$$

که در آن میانگین فشار اعمال شده و برابر $P / \pi a^2$ می باشد.

همچنین ضرایب تأثیر زیر توسط پولوس برای نشست شالوده مدور صلب ارائه شده است:

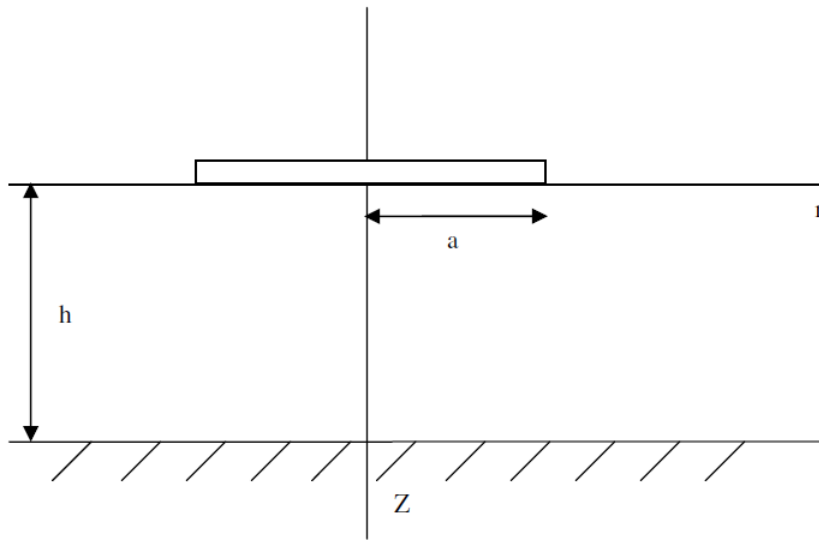


شکل ۱۶. ضریب تأثیر نشست شالوده مدور صلب

برای بارگذاری دایره ای یکنواخت بر روی یک شالوده صلب محدود به سنگ بستر رابطه زیر توسط آگورو ارائه گردیده است:

$$S_{edge} = \frac{pa(1-\nu^2)}{E} I_e \quad (24)$$

$$S_{center} = \frac{2pa}{E} I_c \quad (25)$$



شکل ۱۷ شالوده صلب مدور در یک محیط نیم بینهایت محدود به سنگ بستر

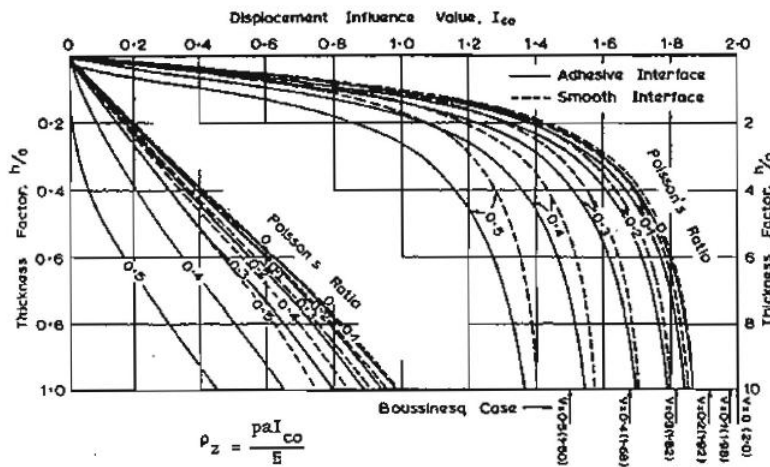
جدول ۷ تغییرات ضریب تأثیر نشست، I_e به ازای نسبت های هندسی مختلف و ضریب پواسون $\nu=0.3$

h/a	I_e	
	SMOOTH INTERFACE (All ν)	ADHESIVE INTERFACE ($\nu=0.3$ only)
0.2	0.005	0.04
0.5	0.12	0.10
1	0.23	0.20
2	0.38	0.34
3	0.45	0.42
5	0.52	0.50
7	0.56	0.54
10	0.58	0.57
∞	0.64	0.64

جدول ۸ تغییرات ضریب تأثیر نشست، I_c به ازای نسبت های هندسی و ضرایب پواسون مختلف

ν	x/a	h/a	0	.2	.4	.6	.8	1.0
0.15	1	0.464	0.458	0.441	0.408	0.348	0.208	
	2	0.684	0.674	0.645	0.593	0.509	0.348	
	4	0.811	0.800	0.768	0.710	0.619	0.463	
	6	0.839	0.827	0.794	0.736	0.646	0.501	
0.30	1	0.397	0.392	0.379	0.351	0.301	0.173	
	2	0.613	0.604	0.578	0.531	0.456	0.305	
	4	0.740	0.732	0.703	0.651	0.568	0.420	
	6	0.770	0.762	0.733	0.681	0.597	0.458	
0.45	1	0.278	0.276	0.267	0.250	0.213	0.109	
	2	0.489	0.482	0.461	0.422	0.361	0.229	
	4	0.612	0.608	0.585	0.541	0.472	0.340	
	6	0.637	0.635	0.612	0.568	0.499	0.374	

همچنین یوشیتا و مایرهوف ضریب تأثیر زیر را برای نشست شالوده مدور صلب محدود به سنگ بستر ارائه دادند:

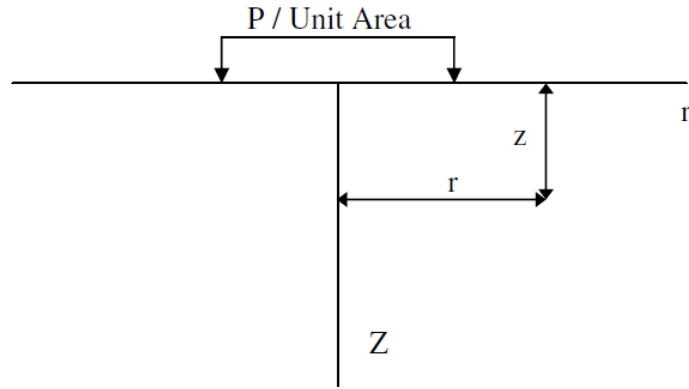


شکل ۱۸ ضریب تأثیر زیر را برای شالوده مدور صلب محدود به سنگ بستر

۵-۱-۱ محاسبه نشست برای بارگذاری حلقوی:

نشست بارگذاری حلقوی انعطاف پذیر یکنواخت قائم (شکل ۱۹) را می توان به کمک رابطه زیر محاسبه کرد

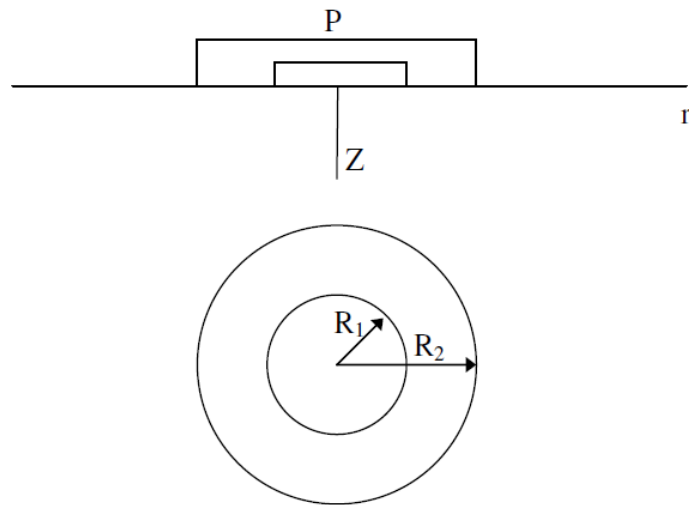
$$S = \frac{P(1+\nu)a}{E(a^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \left[2(1-\nu) + \frac{z^2}{(a^2+z^2)} \right] \quad (26)$$



شکل ۱۹ بارگذاری حلقوی انعطاف پذیر یکنواخت قائم

اگر دو جابه جایی قائم حلقه صلب در یک فضای نیم بینهایت را به صورت زیر ارائه داد:

$$S = \frac{P(1-\nu^2)}{E R_2} \omega(n) \quad (27)$$



شکل ۲۰ بارگذاری حلقوی صلب در یک محیط نیم بینهایت

$$n = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{که در آن:}$$

مقادیر $\omega(n)$ به کمک جدول زیر محاسبه می شود:

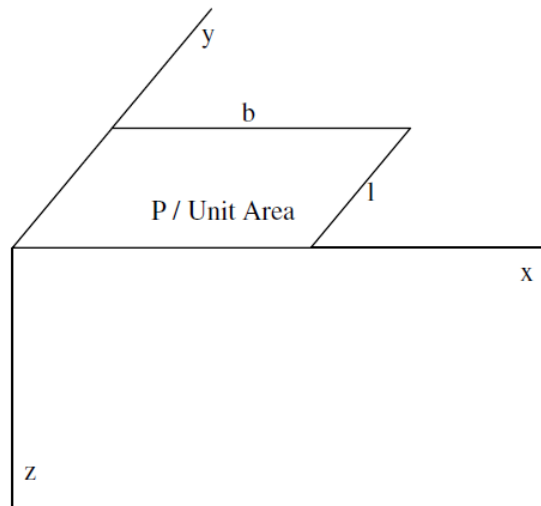
جدول ۹ مقادیر $\omega(n)$

n	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.95
$\omega(n)$	0.50	0.50	0.51	0.52	0.57	0.60	0.65

۱-۱-۶ محاسبه نشست برای بارگذاری مستطیلی:

هار تغییر شکل در عمق z زیر گوشه سطح مستطیلی بارگذاری شده را به صورت زیر بیان کرد:

$$S_e(\text{corner}) = \frac{pb}{2E}(1-\nu^2) \left[I_3 - \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) I_4 \right] \quad (28)$$



شکل ۲۱ بارگذاری مستطیلی یکنواخت قائم در یک محیط نیم بینهایت

که در آن ضرایب تأثیر تابعی از $n=z/B$ و $m=L/B$ است و از روابط زیر بدست می آید:

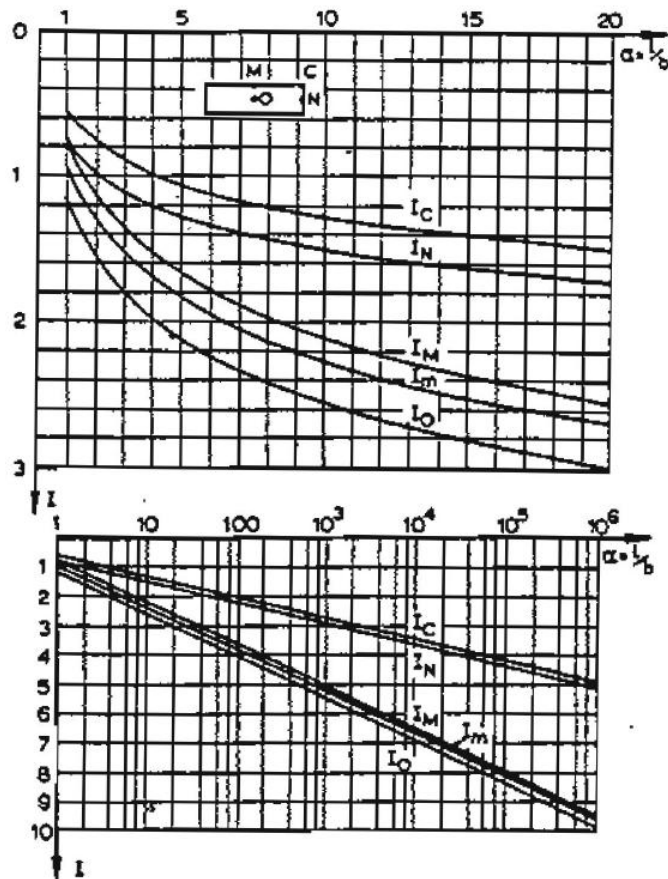
$$I_3 = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{1+m^2+n^2}+m}{\sqrt{1+m^2+n^2}-m} \right) \right] + m \ln \left[\frac{\sqrt{1+m^2+n^2}+1}{\sqrt{1+m^2+n^2}-1} \right] \quad (29)$$

$$I_4 = \frac{n}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{m}{n\sqrt{1+m^2+n^2}} \right)$$

جهت محاسبه نشست ارتجاعی در گوشه سطح مستطیلی در سطح زمین با جایگذاری $z/B=n=0$ در معادله بالا و انجام

محاسبات داریم :

$$S_e(\text{corner}) = \frac{pB}{2E}(1-\nu^2)I_3 \quad (30)$$

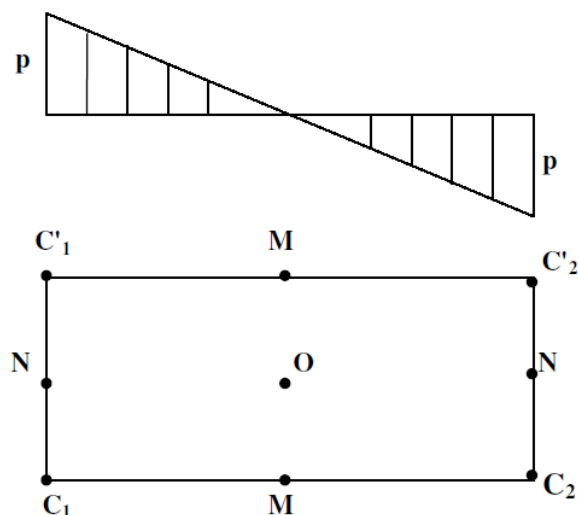


شکل ۲۲ ضرایب تأثیر نشست بر حسب نسبت های هندسی

برای بارگذاری با تغییرات خطی گبرود نشست سطح ناحیه بارگذاری شده در چهار نقطه زیر سطح مستطیل (شکل

۲۳) را به صورت زیر ارائه داد:

$$S = \frac{(1-\nu^2)}{E} p b l \quad (۳۴)$$



شکل ۲۳ ناحیه بارگذاری شده مستطیلی با تغییرات خطی

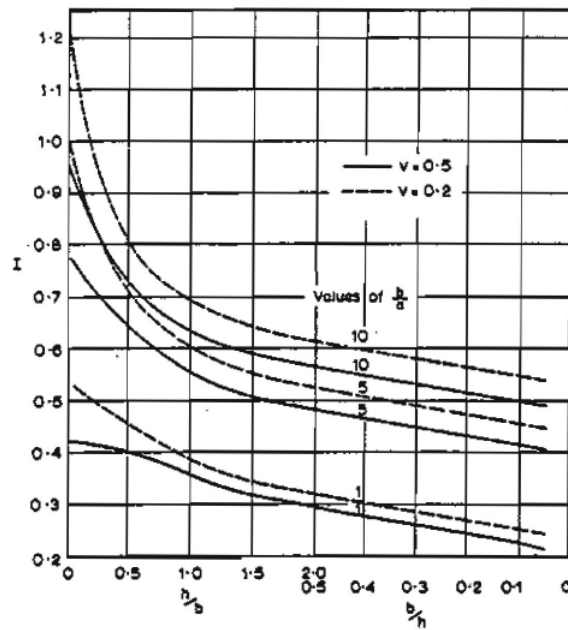
که در آن ضریب تأثیر I به کمک جدول ۱۱ محاسبه می شود.

جدول ۱۱ ضریب تأثیر نشست ناحیه بارگذاری شده مستطیلی با تغییرات خطی

$b \geq l$			$l \geq b$					
b/l	I_C	I_N	l/b	I_C'	I_N'	l/b	I_C'	I_N'
1	0.149	0.263	1	0.149	0.263	15	0.785	0.995
1.1	0.150	0.269	1.1	0.162	0.282	20	0.872	1.084
1.2	0.151	0.274	1.2	0.174	0.300	25	0.940	1.154
1.3	0.152	0.279	1.3	0.187	0.317	30	0.995	1.211
1.4	0.153	0.282	1.4	0.198	0.334	40	1.084	1.301
1.5	0.154	0.286	1.5	0.210	0.349	50	1.154	1.371
1.6	0.154	0.289	1.6	0.221	0.364	60	1.211	1.429
1.7	0.155	0.291	1.7	0.232	0.379	70	1.259	1.478
1.8	0.155	0.294	1.8	0.243	0.392	80	1.301	1.520
1.9	0.156	0.296	1.9	0.253	0.406	90	1.338	1.557
2	0.156	0.297	2	0.263	0.418	100	1.371	1.590
2.2	0.157	0.300	2.2	0.282	0.442	200	1.590	1.810
2.4	0.157	0.303	2.4	0.300	0.465	300	1.719	1.939
2.5	0.157	0.304	2.5	0.309	0.475	400	1.810	2.031
3	0.158	0.308	3	0.349	0.524	500	1.881	2.101
3.5	0.158	0.310	3.5	0.386	0.566	600	1.939	2.159
4	0.158	0.312	4	0.418	0.603	700	1.988	2.208
4.5	0.159	0.313	4.5	0.448	0.636	800	2.031	2.251
5	0.159	0.314	5	0.475	0.666	900	2.068	2.288
6	0.159	0.315	6	0.524	0.719	10^3	2.101	2.322
7	0.159	0.316	7	0.566	0.765	10^4	2.834	3.055
8	0.159	0.317	8	0.603	0.804	10^5	3.567	3.788
10	0.159	0.317	9	0.636	0.840	10^6	4.300	4.521
∞	0.159	0.318	10	0.666	0.872	∞	∞	∞

برای شالوده ای که در عمق h زیر سطح یک نیم فضای نیم بینهایت قرار دارد گروس و چپمن رابطه زیر را ارائه دادند که ضریب تأثیر رابطه به کمک نمودار ۲۴ بدست می آید.

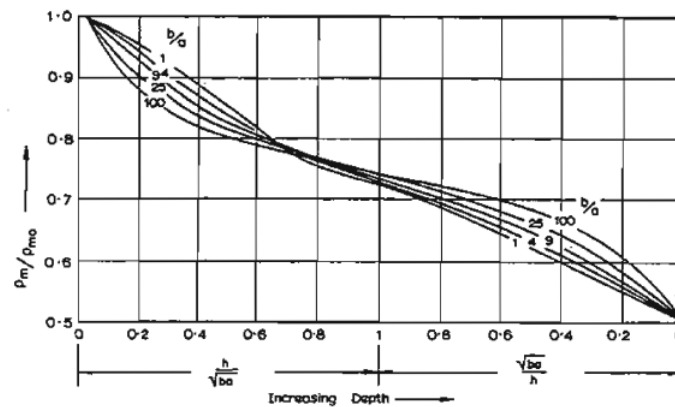
$$S = \frac{q a I}{E} \quad (۳۵)$$



شکل ۲۴. ضریب نشست گوشه شالوده مدفون در عمق h

فوکس رابطه ای را بین نشست میانگین ناحیه بارگذاری شده در سطح (ρ_{mo}) و نشست ناحیه بارگذاری شده در عمق

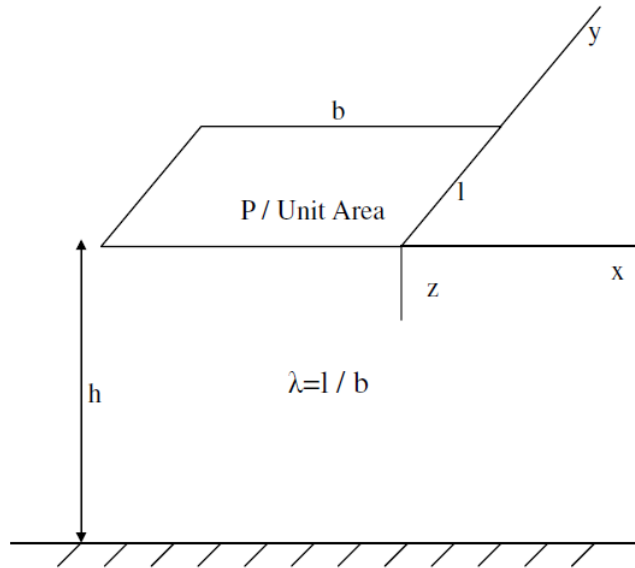
پایین تر از سطح (ρ_m) ارائه داد.



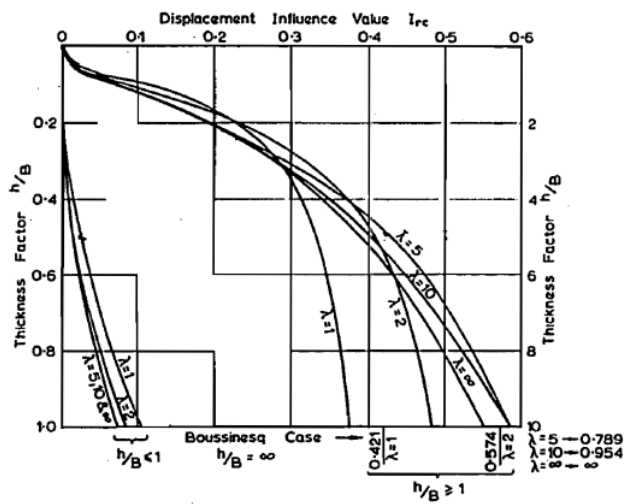
شکل ۲۵. نسبت نشست میانگین شالوده مستطیلی مستقر در عمق h نسبت به شالوده مستقر در سطح برای $\nu=0.5$

برای بارگذاری مستطیلی در یک نیم فضای محدود به سنگ بستر صلب (شکل ۲۶) یوشیتا و مایرهورف رابطه زیر را ارائه دادند که در آن ضریب تأثیر نشست، I_{rc} به ازای ضرایب پواسون مختلف در اشکال ۲۷-الف تا و آمده است.

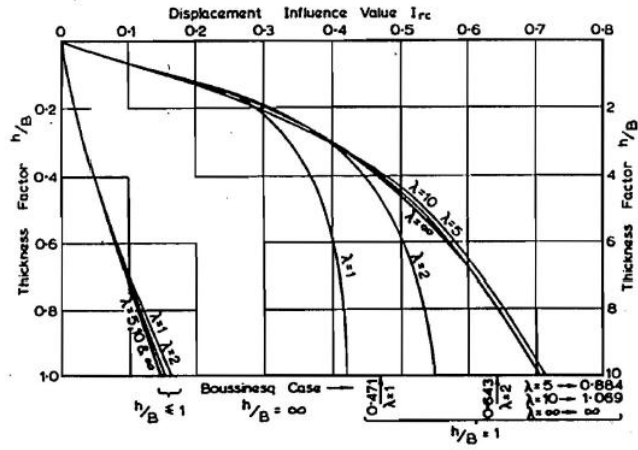
$$S = \frac{pB}{E} I_{rc} \quad (۳۶)$$



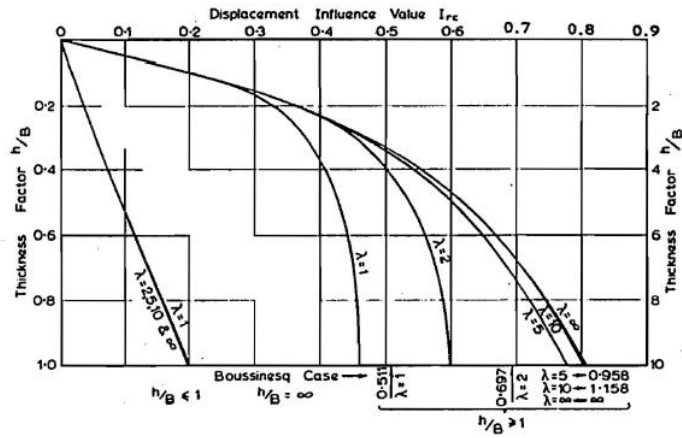
شکل ۲۶ بارگذاری مستطیلی در یک نیم فضای محدود به سنگ بستر صلب



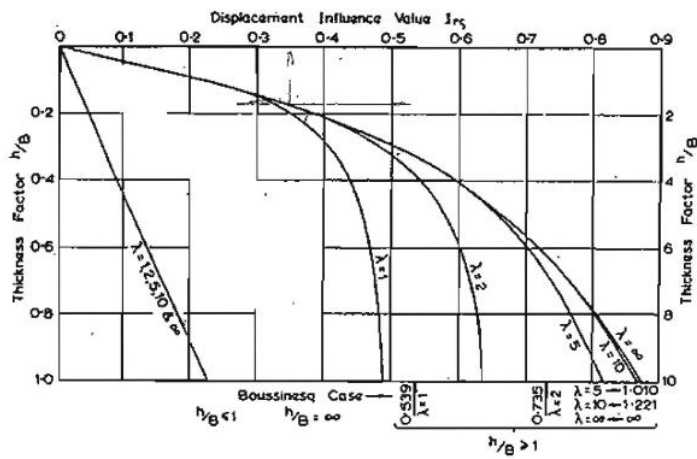
(الف)



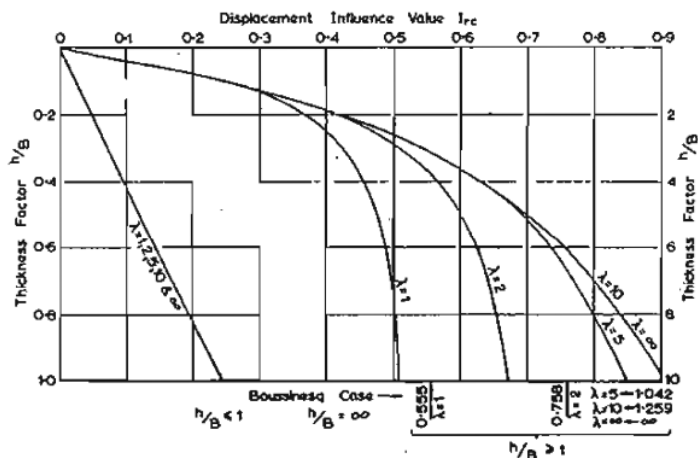
(a)



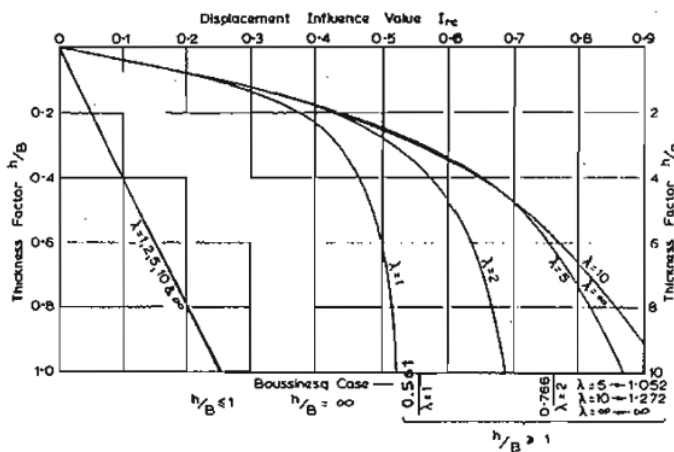
(b)



(c)



(د)



(و)

شکل ۲۷ ضریب تأثیر نشست گوشه شالوده مستطیلی به ازای مقادیر الف) $\nu=0.5$ ب) $\nu=0.4$ ج) $\nu=0.3$ د) $\nu=0.2$ ه) $\nu=0.1$ و

$$\nu=0$$

ضرایب تأثیر برای هر دو حالت جابه جایی افقی و قائم گوشه یک بارگذاری مستطیلی توسط دیویس و تیلور برای یک شالوده زیر متکی بر نیم فضای محدود به سنگ بستر صلب ارائه گردیده که در آن هر دو نوع بارگذاری یکنواخت قائم، q_y و افقی q_x لحاظ شده است. به عنوان نمونه نشست گوشه یک بارگذاری مستطیلی در جهت مثبت محور xy به صورت زیر بدست می آید:

$$S_{ij} = q_j \frac{h}{E} (1 + \nu) I_{ij} \quad (37)$$

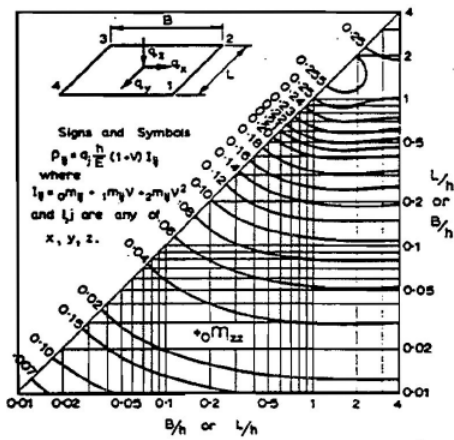
که در آن:

$$I_{ij} = {}_0m_{ij} + {}_1m_{ij}v + {}_2m_{ij}v^2 \quad (38)$$

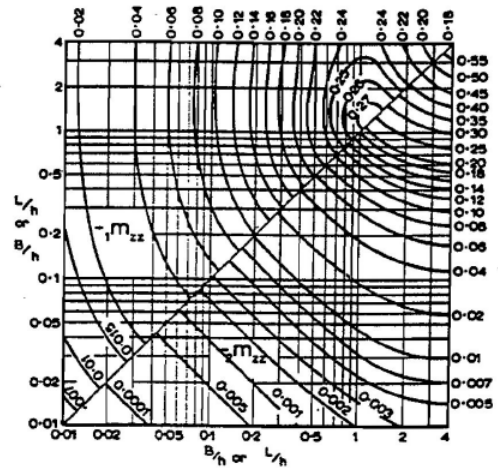
i, j هر کدام از جهات x, y, z می تواند باشد. به عنوان مثال جابه جایی قائم به علت بارگذاری یکنواخت افقی در جهت y به صورت زیر بدست می آید:

$$S_{zy} = q_y \frac{h}{E} (1+v) I_{zy}$$

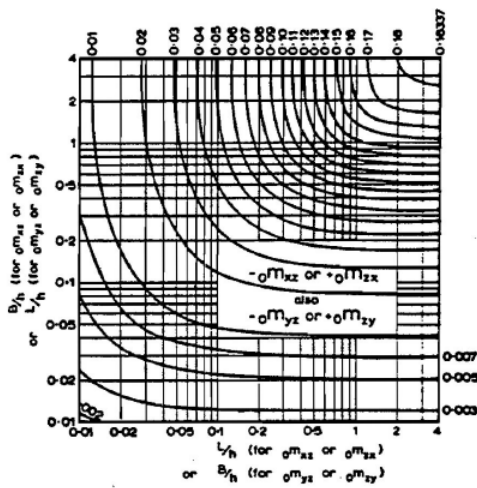
ضرایب تأثیر مربوط به m در شکل ۲۸ آمده است.



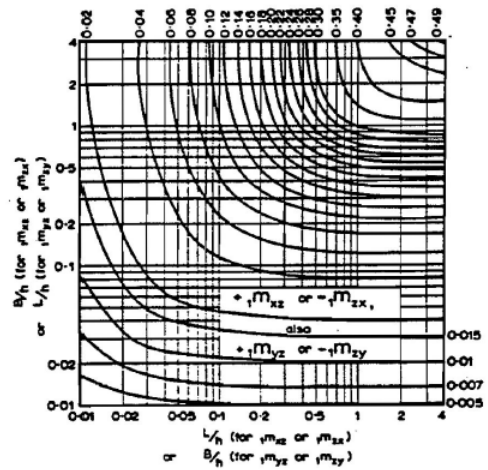
(ب)



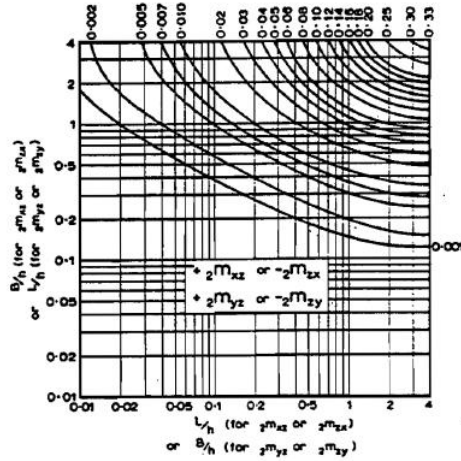
(الف)



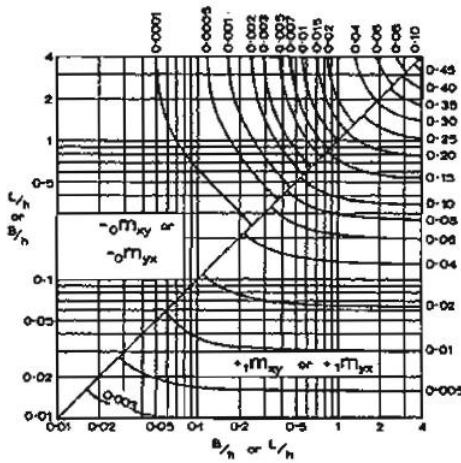
(د)



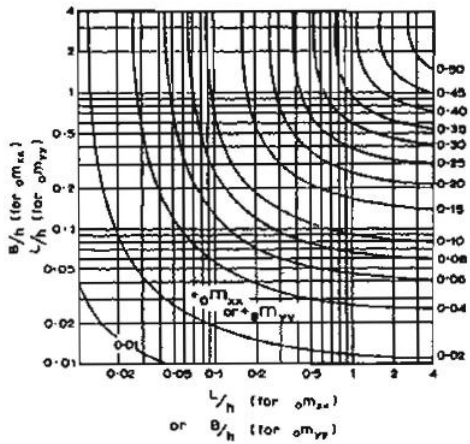
(ج)



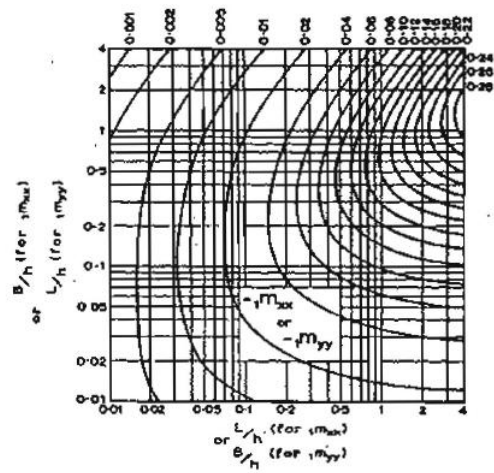
(ا)



(ب)



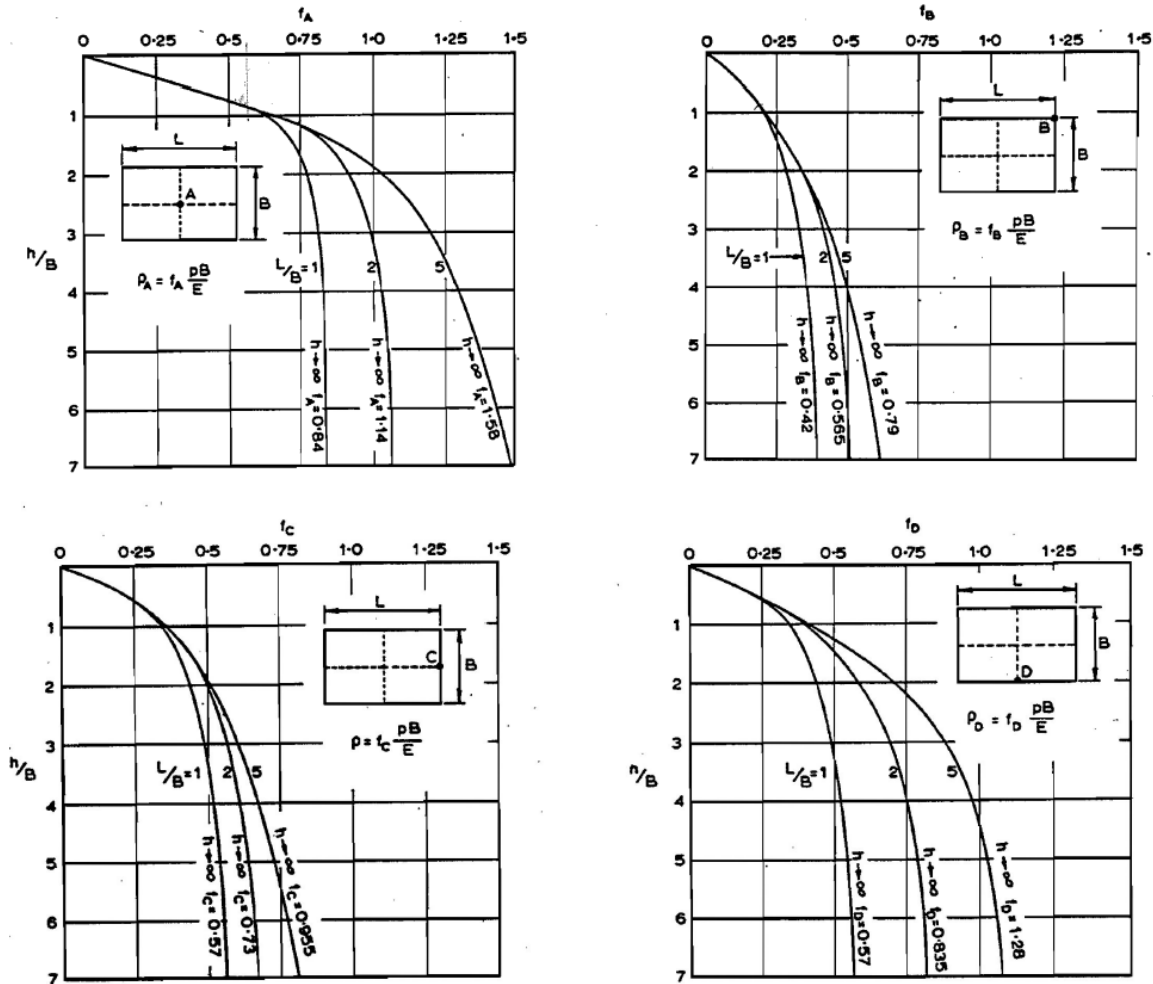
(ج)



(د)

شکل ۲۸. ضرایب تأثیر نشست

مسئله مربوط به یک شالوده مستطیلی صلب و بدون اصطکاک توسط سوینگ مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در قالب نمودارهای زیر ارائه گردیده است.



شکل ۲۹ نشست شالوده مستطیلی در نقاط مختلف زیر شالوده به ازای $\nu=0.5$

نشست ارتجاعی گوشه مستطیل بارگذاری شده به ابعاد $L' \times B'$ بر روی سطح یک نیم فضای الاستیک توسط تیموشینکو و گودیر به صورت زیر ارائه گردیده است:

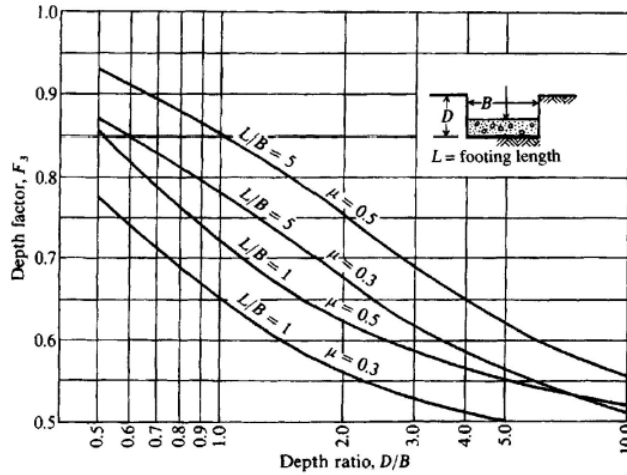
$$\Delta H = q_0 B' \frac{1-\mu'}{E_s} \left(I_1 + \frac{1-2\mu}{1-\mu} I_2 \right) I_F \quad (39)$$

که در I_1 و I_2 ضرایب تأثیر بوده و از روابط زیر بدست می آید:

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \left[M L n \frac{(1 + \sqrt{M^2 + 1}) \sqrt{M^2 + N^2}}{M (1 + \sqrt{M^2 + N^2 + 1})} + L n \frac{(M + \sqrt{M^2 + 1}) \sqrt{1 + N^2}}{M + \sqrt{M^2 + N^2 + 1}} \right] \quad (40)$$

$$I_2 = \frac{N}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{M}{N \sqrt{M^2 + N^2 + 1}} \right)$$

در رابطه بالا \tan^{-1} بر حسب رادیان و $M=L/B'$ و $N=H/B'$ می باشد.

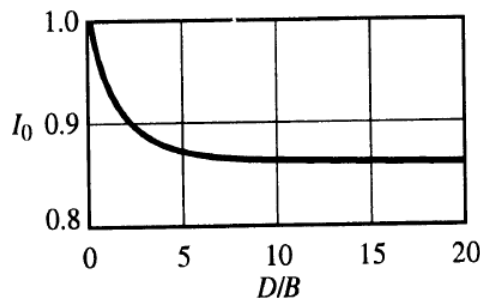


شکل ۳۰ ضریب تأثیر عمق استقرار شالوده

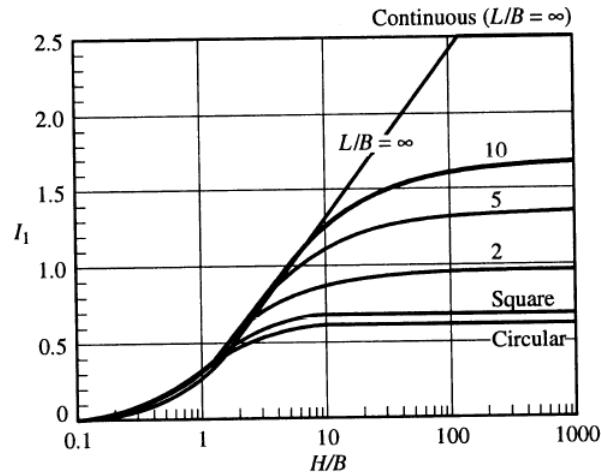
جانبو و همکاران به کمک تئوری الاستیسیته رابطه زیر را برای محاسبه نشست آنی ارائه دادند:

$$\delta_d = \frac{(q - \sigma'_d) B}{E_u} I_0 I_1 \quad (41)$$

که در آن I_0, I_1 ضرایب تأثیر و E_u مدول الاستیسیته زهکشی نشده است. ضرایب تأثیر به طور کلی به شکل و ابعاد شالوده، تغییرات سختی خاک با عمق، نسبت پواسون، نحوه توزیع فشار و نقطه ای که نشست در آن محاسبه می شود بستگی دارند. برای تعیین ضرایب تأثیر I_0, I_1 می توان از نمودارهای زیر استفاده کرد:



نمودار ۳۱ تغییرات ضرایب I_0 با نسبت های هندسی



نمودار ۳۲ تغییرات ضرایب I_1 با نسبت های هندسی

محاسبه مدول الاستیسیته زهکشی نشده خاک بسیار دشوار است زیرا که رابطه خطی بین تنش و کرنش برقرار نیست. یک روش برای محاسبه این پارامتر، اعمال بار به صورت پلکانی بر روی نمونه دست نخورده در دستگاه سه محوری و محاسبه تغییر شکل های حاصله می باشد. این روش مقادیر کمتری را برای E_u ارائه می دهد. این پارامتر به دست خوردگی نمونه بسیار حساس بوده و مقدار آن ممکن است تا سه برابر تغییر یابد. از این رو روش های آزمایشگاهی مستقیم روش مناسبی برای محاسبه E_u نیستند و بهتر است از رابطه تجربی این پارامتر با مقاومت برشی زهکشی نشده، S_u استفاده شود. این رابطه دقیق نیست و E_u/S_u از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متغیر است اما رابطه $E_u=300 S_u$ خطایی کمتر از ± 5 میلی متر را برای نشست آنی در بر دارد.

گرتاس و همکاران تجدیدنظری در رابطه پایه برای نشست ارتجاعی به عمل آوردند که نقطه نظرات آنها به شرح زیر می باشد:

- ۱) سختی خاک (که در روابط مربوط به نشست الاستیک با E نشان داده می شود) عموماً با عمق افزایش می یابد و حاصل آن کاهش نشست خواهد بود. این پدیده به صورت ضریب μ_0 در روابط اعمال شده است.
- ۲) وجود تنش های حاصل از بارگذاری، موجب افزایش تنش های احاطه کننده در محدوده میانی خاک زیر پی شده و بنابراین خاک سخت تر عمل می نماید. این پدیده اثرات ترانشه ای یا عمق استقرار نامیده می شود (μ_{emb}).
- ۳) بخشی از بار وارده بر روی پی ممکن است از طریق دیواره های اطراف فونداسیون که با آن یکپارچه هستند از طریق بسیج مقاومت برشی در سطح تماس خاک و دیوار تحمل گردد. تحمل بخشی از بار از طریق اصطکاک جانبی موجب کاهش نشست خاک می گردد. این پدیده اثرات تماس جانبی دیواره نامیده می شود (μ_{wall}).

$$S_i = \frac{q_0 B}{E_s} (1 - \nu^2) \mu_s \mu_{emb} \mu_{wall} \quad (42)$$

مقادیر ضرایب اصلاحی به کمک روابط زیر محاسبه می گردند:

$$\mu_s = 0.45 \left(\frac{A_b}{4L^2} \right)^{-0.38} \quad (43)$$

$$\mu_{emb} = 1 - 0.04 \frac{D_f}{B} \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{A_b}{4L^2} \right) \right] \quad (44)$$

$$\mu_{wall} = 1 - 0.16 \left(\frac{A_w}{A_b} \right)^{0.54} \quad (45)$$

در روابط فوق $2L$ و $2B$ عرض و طول مستطیل در برگرفته پی، A_b سطح تماس کف پی با زمین و A_w سطح تماس دیوار با خاک اطراف می باشد.

برای محاسبه $A_b / (4L^2)$ و اشکال متداول پی می توان از جدول ۱۲ استفاده کرد.

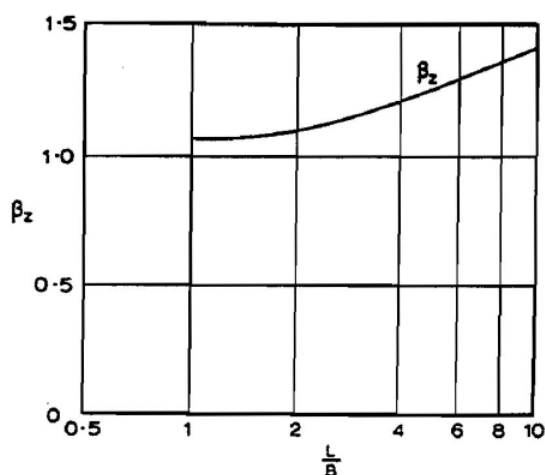
جدول ۱۲ مقادیر $A_b / (4L^2)$ برای اشکال متداول پی

شکل پی	$A_b / (4L^2)$
مربعی	1
مستطیلی	B / L
دایره ای	0.785
نواری	0

برای محاسبه نشست شالوده مستطیلی صلب بدون اصطکاک ویتمن و ریچارت رابطه زیر را ارائه دادند:

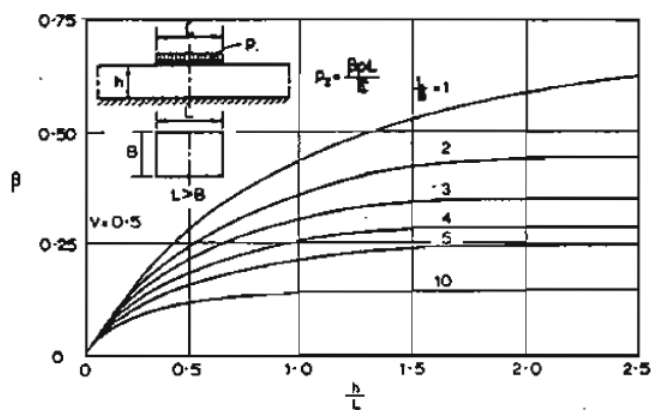
$$S = \frac{P(1 - \nu^2)}{\beta_z \sqrt{BL} E} \quad (46)$$

که β_z ضریب وابسته به L / B می باشد و به کمک شکل ۳۳ محاسبه می گردد.



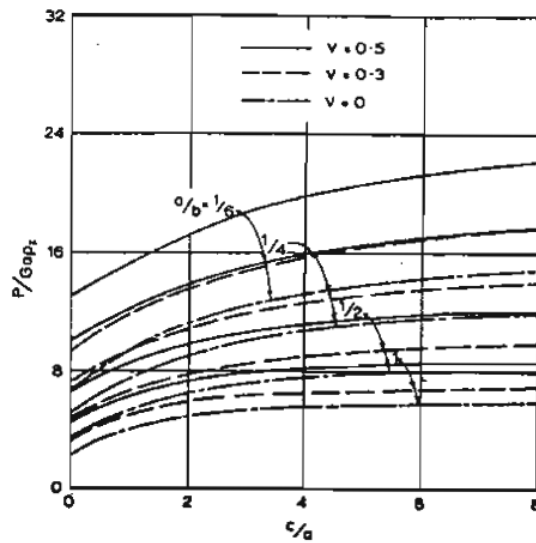
شکل ۳۳ ضریب β_z برای نشست شالوده مستطیلی صلب

سویک نشست شالوده مستطیلی بدون اصطکاک صلب با بارگذاری قائم در یک محیط محدود را به صورت زیر ارائه داد:



شکل ۳۴ نشست قائم شالوده مستطیلی صلب

برای محاسبه نشست گوشه و مرکز یک شالوده مستطیلی صلب که در عمق C زیر سطح یک فضای نیم بینهایت قرار دارد می‌توان از نمودار زیر که توسط باترفیلد و بانرجی ارائه گردیده استفاده کرد:



شکل ۳۵ نشست شالوده قائم مستقر در عمق C

به عنوان یک راه حل های تقریبی برای نشست شالوده های صلب روابط تقریبی زیر توسط دیویس و تیلور برای نشست نواحی با بارگذاری قائم ارائه گردیده اند:

$$S_{rigid} = \frac{1}{2} [S_{center} + S_{edge}]_{flexible} \quad \text{برای پی دایره ای و نواری:} \quad (47)$$

$$S_{rigid} = \frac{1}{3} [2S_{center} + S_{corner}]_{flexible} \quad \text{برای پی مستطیلی:} \quad (48)$$

به طور کلی می توان گفت که نشست ارتجاعی شالوده صلب تحت بار یکنواخت در سطح زمین در حدود هفت درصد از نشست متوسط شالوده انعطاف پذیر با همان ابعاد واقع در سطح زمین کمتر است. از این رو برای محاسبه مقادیر نشست شالوده های صلب، مقادیر محاسبه شده برای شالوده های انعطاف پذیر در عدد $0/93$ ضرب می گردد

۲-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای ناهمگن:

یکی از عواملی که رفتار نهشته های طبیعی را تحت تأثیر قرار می دهد ناهمگونی می باشد. ناهمگونی به ویژگی از خاک اطلاق می شود که در آن، ویژگی مزبور از نقطه ای به نقطه دیگر متفاوت باشد. تقریباً همه نهشته های طبیعی دارای پارامترهای فیزیکی و مکانیکی متغیر و ناهمگون هستند. ناهمگونی در نهشته های طبیعی را می توان به طور کلی در دو قالب ناهمگونی لایه بندی^۱ و ذاتی^۲ بررسی نمود. ناهمگونی لایه بندی به صورت ظهور یک لایه یا لایه های نرم یا سخت در بین لایه های

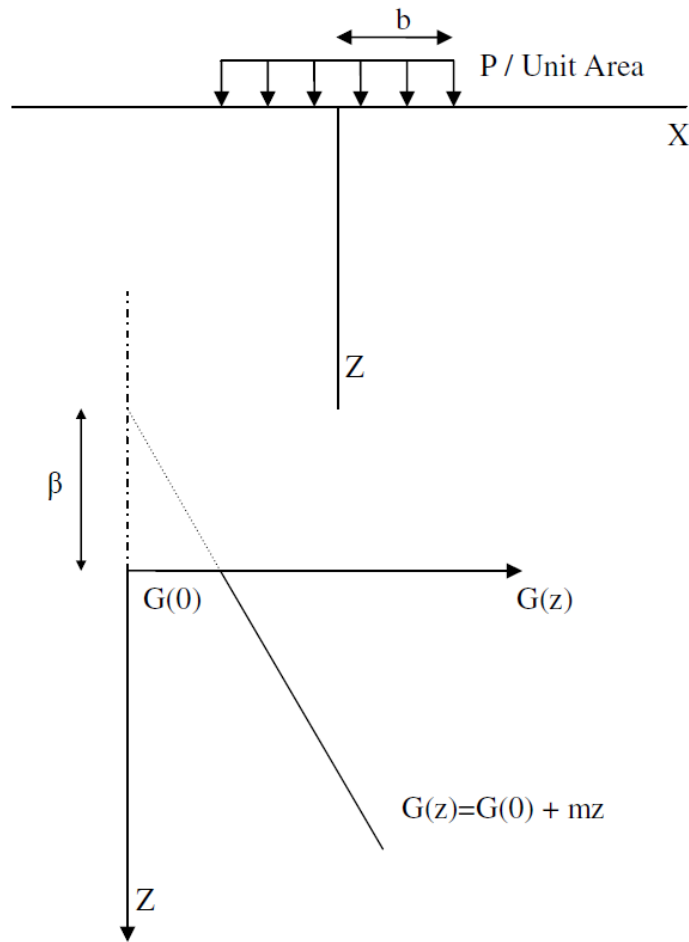
¹ Lithological Heterogeneity

² Inherent Heterogeneity

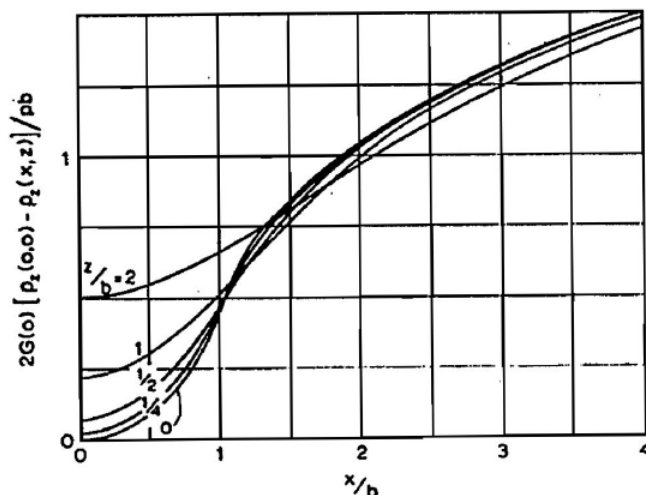
سخت و یا نرم بروز می‌نماید. نوع دوم ناهمگونی به صورت تغییرات ذاتی در خواص خاک ظاهر می‌شود. تأثیر هر کدام از انواع ناهمگونی در نشست شالوده‌های سطحی به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۱ محاسبه نشست برای نیم فضای ناهمگن ذاتی:

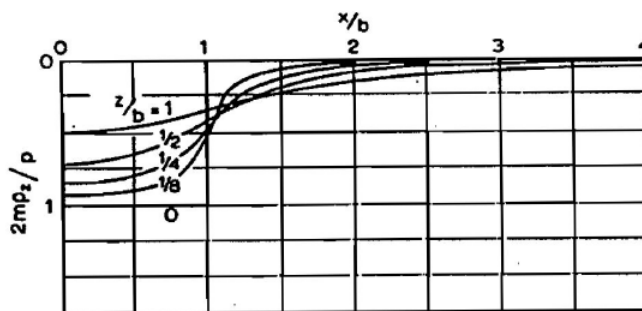
اشکال ۳۷ و ۳۸ نشست نسبی یک شالوده نواری با بارگذاری یکنواخت در یک محیط ناهمگن ذاتی را برای دو حالت مختلف نشان می‌دهد:



شکل ۳۶ شالوده نواری در یک محیط ناهمگن ذاتی

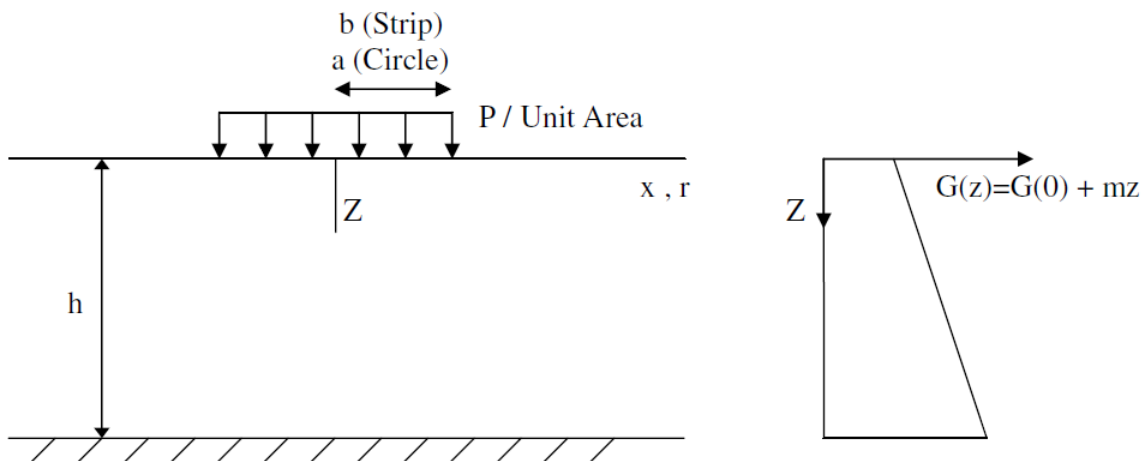


شکل ۳۷ نشست نسبی شالوده نواری با $\nu=0.5$ و $G=G(0)$

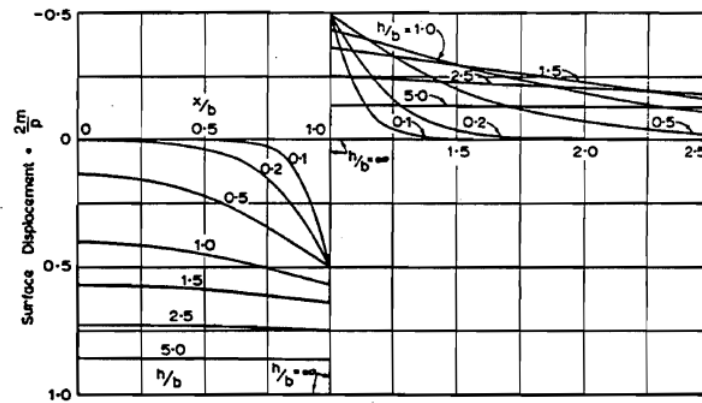


شکل ۳۸ نشست شالوده نواری با تغییرات خطی G با $\nu=0.5$ و $G=G(0)$

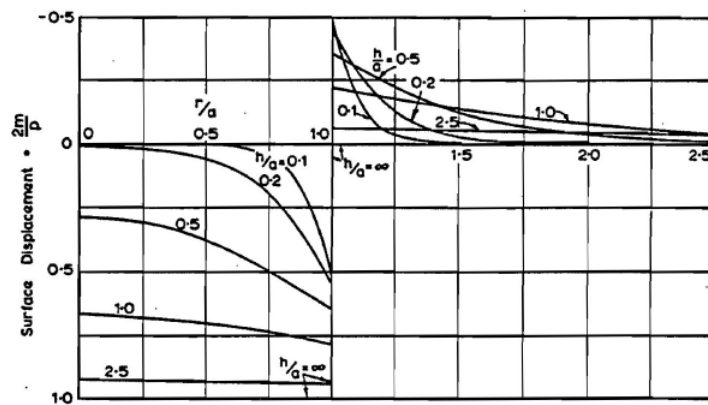
مسئله مربوط به فضای محدود به سنگ بستر با تغییرات خطی مدول تغییرشکل (شکل ۳۹) توسط گیبسون و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. پروفیل تغییرشکل قائم به علت بارگذاری یکنواخت نواری در شکل ۴۰ و بارگذاری دایروی در شکل ۴۱ آمده است. در هر دو آنها $\nu=0.5$ و $G(0)=0$ می باشد.



شکل ۳۹ بارگذاری دایره ای و نواری در یک محیط ناهمگن محدود به سنگ بستر



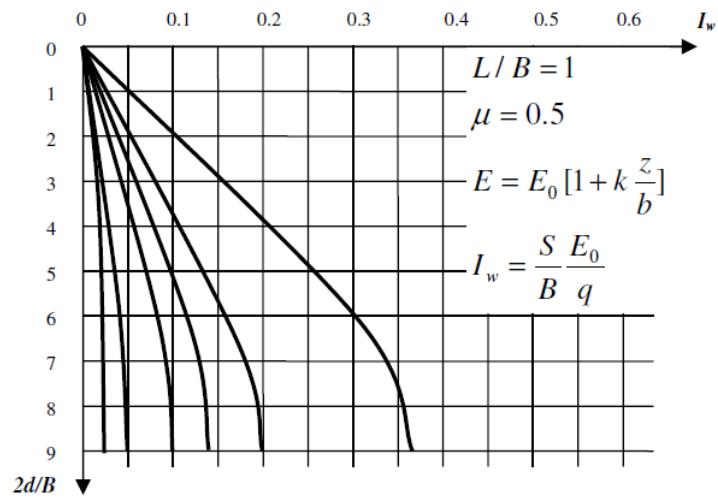
شکل ۴۰ پروفیل جابه جایی سطحی به علت بارگذاری یکنواخت نواری



شکل ۴۱ پروفیل جابه جایی سطحی به علت بارگذاری یکنواخت دایره ای

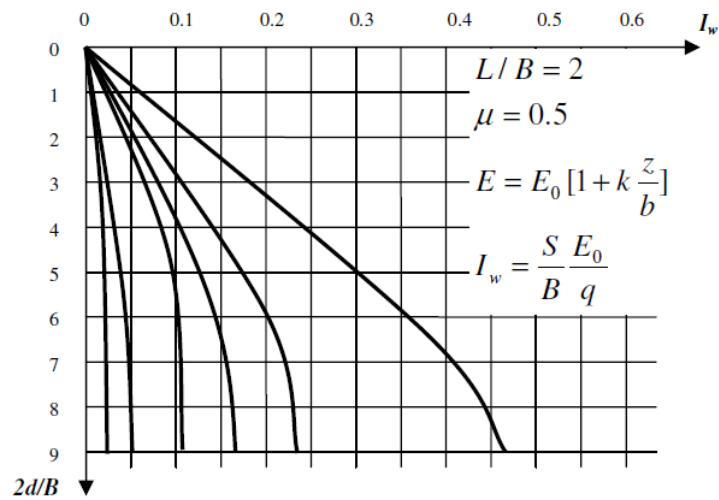
در مورد بارگذاری دایره‌ای و مستطیلی در یک نیم فضای ناهمگن برون و گیبسون نمودارهای زیر را برای محاسبه

نشست ارائه دادند:



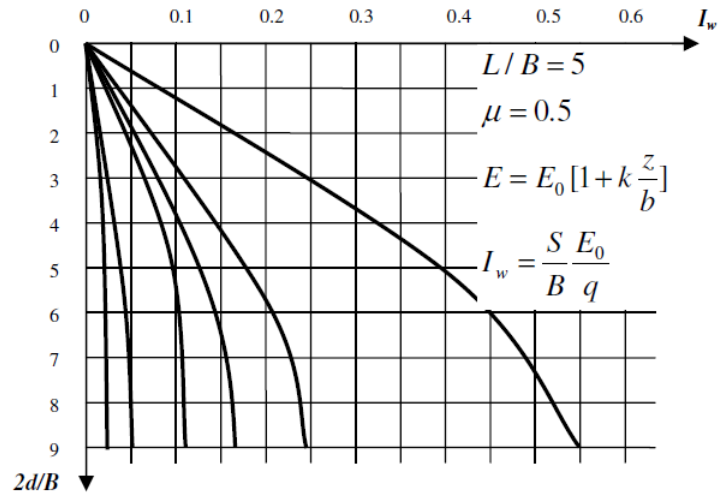
شکل ۴۲ دیاگرام محاسبه نشست برای یک شالوده مربع شکل با بارگذاری یکنواخت بر روی خاک بستر غیر همگن

به ضخامت d



شکل ۴۳ دیاگرام محاسبه نشست برای یک شالوده مستطیل شکل ($L/B=2$) با بارگذاری یکنواخت بر روی خاک بستر غیر همگن به

ضخامت d



شکل ۴۴ دیاگرام محاسبه نشست برای یک شالوده مستطیل شکل ($L/B=5$) با بارگذاری یکنواخت بر روی خاک بستر غیر همگن به

ضخامت d

ماین و پولوس رابطه زیر را برای محاسبه نشست شالوده های سطحی ارائه دادند که در آن فرض شده است که مدول

تغییر شکل خاک به صورت خطی با عمق افزایش می یابد.

$$S = \frac{q_{net} B' (1-\nu^2) I_G I_F I_E}{E_0} \quad (49)$$

که در آن:

$$B' = \left(\frac{4BL}{\pi} \right)^{0.5} = \text{قطر معادل شالوده مستطیلی}$$

ν = نسبت پواسون خاک

I_G = ضریب تأثیر جابه جایی (شکل ۴۵)

I_E = ضریب تأثیر نشست برای لحاظ کردن اثر عمق استقرار شالوده

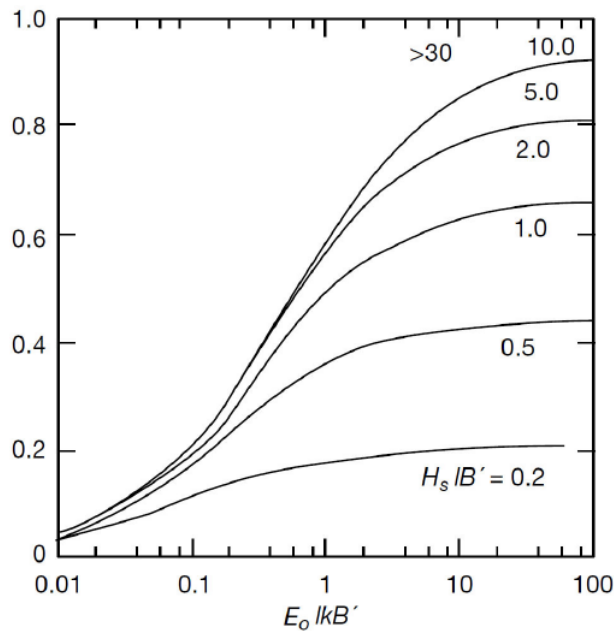
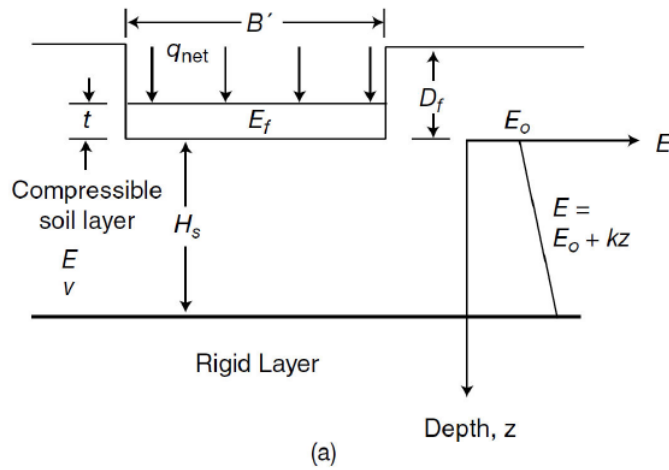
I_F = ضریب تأثیر صلبیت شالوده

برای محاسبه ضرایب I_E و I_F از روابط زیر استفاده می شود:

$$I_E = 1 - \frac{1}{3.5 \exp(1.22\nu - 0.4) \left[\left(\frac{B'}{D_f} \right) + 1.6 \right]} \quad (50)$$

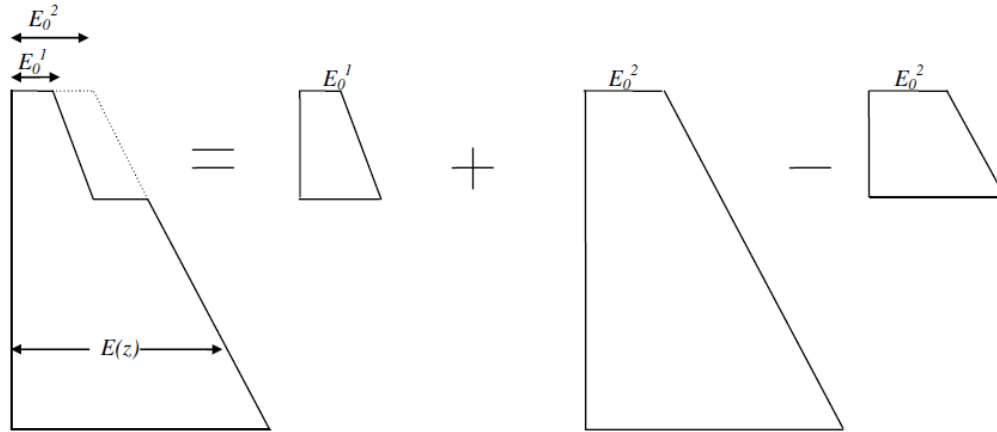
$$I_F = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{4.6 + 10 \left(\frac{E_f}{E_0 + \frac{B'}{2}k} \right) \left(\frac{2t}{B'} \right)^3} \quad (51)$$

که در آن E_f مدول الاستیسیته مصالح شالوده، t ضخامت شالوده و k افزایش سختی به ازای افزایش واحد عمق می باشد
 $(E = E_0 + kz)$



شکل ۴۵ (a) فضای ناهمگن با تغییرات خطی مدول الاستیسیته (b) تغییرات I_G

آزمایشات انجام شده بر روی صفحه صاف مدور توسط کریپر و کریستین نشان داد که ناهمگنی عمدتاً موجب کاهش نشست شالوده ها می گردد. در صورتی که خاک زیر شالوده شامل لایه هایی با انواع مختلف ناهمگنی باشد، تغییرات مدول تغییر شکل با عمق را می توان از برهم نهی حالت های ساده زیر بدست آورد (شکل).

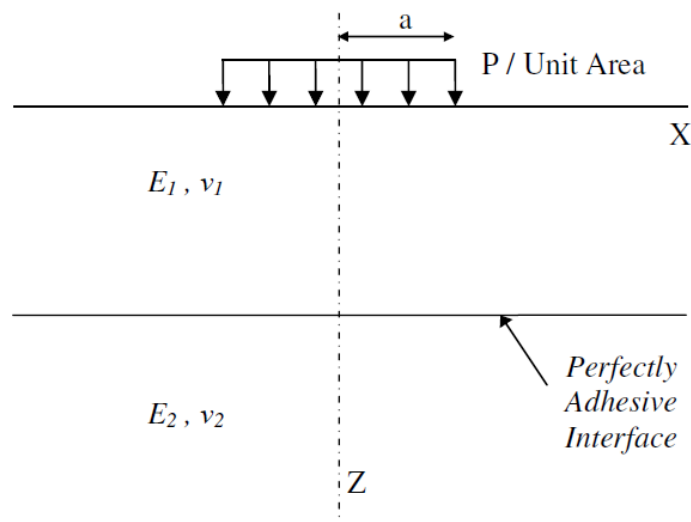


شکل ۴۶ برهم نهی مدول تغییر شکل خاک بستر غیر همگن

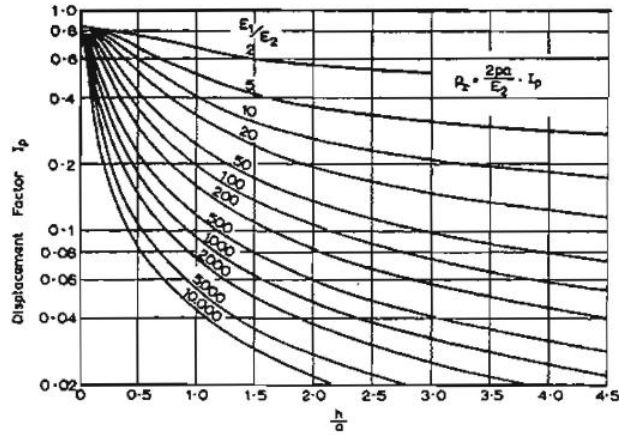
۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن با لایه بندی متفاوت:

۱-۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن دو لایه:

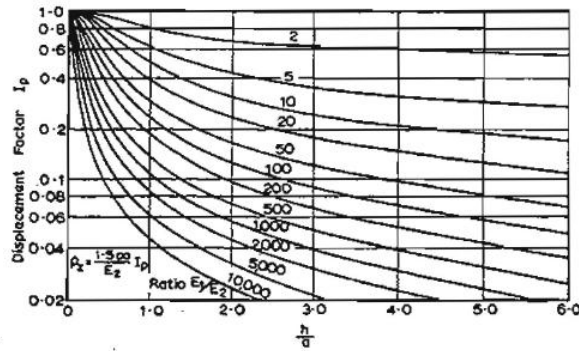
ضرایب تأثیر برای مرکز یک بارگذاری مدور سطحی قائم (شکل ۴۷) برای $\nu_1=0.2$ و $\nu_2=0.4$ توسط بورمیستر و برای $\nu_1=\nu_2=0.5$ توسط بورمیستر و $\nu_1=\nu_2=0.35$ توسط تن دبارس ارائه گردیده است.



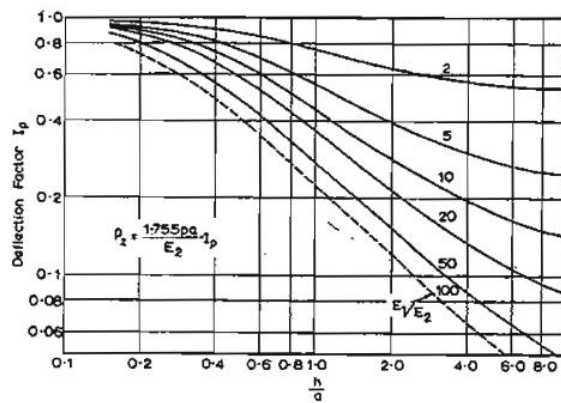
شکل ۴۷ بارگذاری دایره ای در سیستم دو لایه



شکل ۴۸ جابه جایی مرکز یک سیستم دو لایه با $\nu_1=0.2$ و $\nu_2=0.4$



شکل ۴۹ جابه جایی مرکز یک سیستم دو لایه با $\nu_1=\nu_2=0.5$

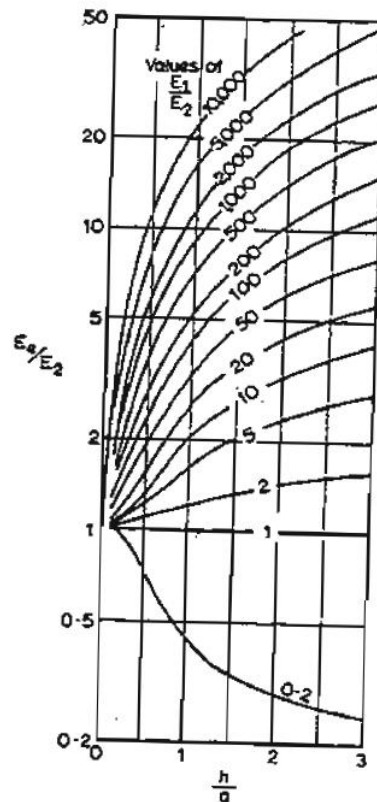


شکل ۵۰ جابه جایی مرکز یک سیستم دو لایه با $\nu_1=\nu_2=0.35$

یوشیتا و مایرهورف نموداری را برای مدول الاستیسیته معادل ارائه داد که به کمک آن می توان در فضای دو لایه به محاسبه نشست پرداخت (با فرض تک لایه بودن فضا). پس از محاسبه مدول معادل، نشست شالوده به کمک رابطه زیر محاسبه می شود:

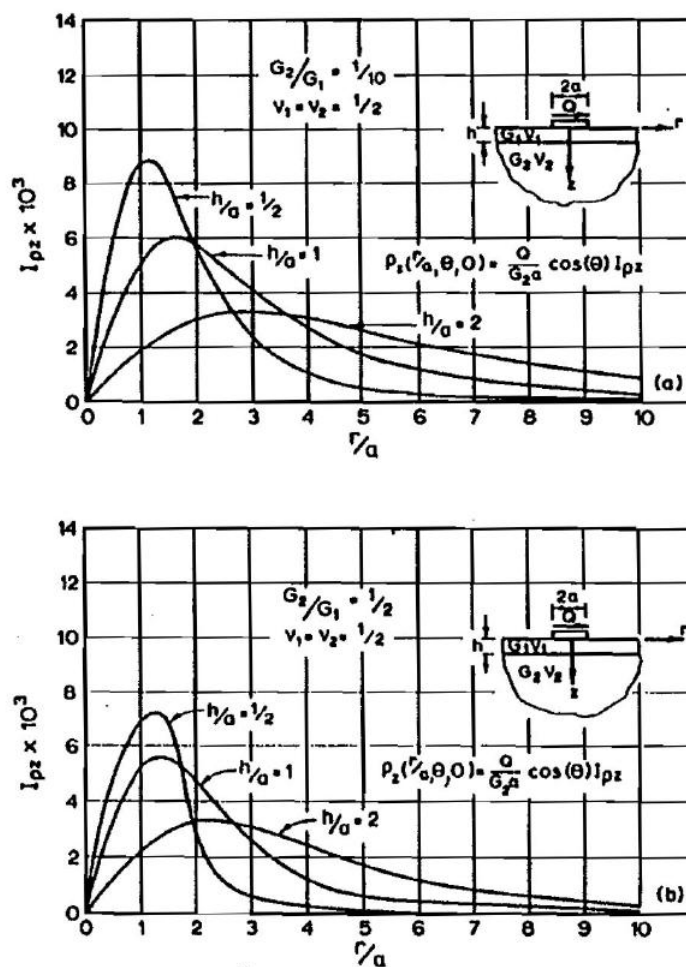
$$S = \frac{1.5 pa}{E_e} \quad (52)$$

مقادیر مدول معادل را می توان به کمک نمودار ۵۱ محاسبه کرد.



شکل ۵۱ مدول معادل برای یک سیستم دو لایه با $\nu_1 = \nu_2 = 0.35$

وسمن ضرایب تأثیر زیر را برای نشست یک محیط دو لایه بر حسب نسبت های هندسی مختلف ارائه داد:



شکل ۵۲ ضرایب تأثیر نشست شالوده مدور در فضای نیم بیستای دو لایه

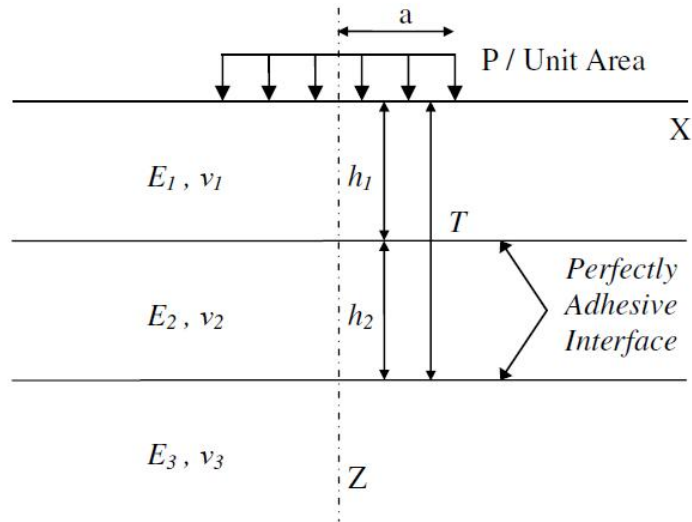
۲-۲-۲-۱- نیم فضای ناهمگن سه لایه:

برای فضاهای سه لایه یوشیتا و مایرهورف روابط زیر را برای محاسبه نشست ارائه دادند که در آنها ضرایب تأثیر به کمک

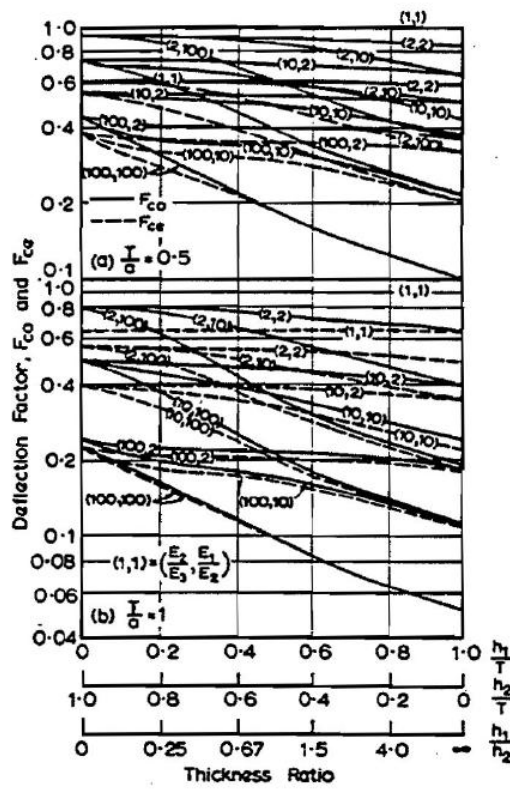
نمودار ۵۴ بدست می آید.

$$S_c = \frac{1.5 pa}{E_3} F_{co} \quad (۵۳) \quad \text{نشست مرکز شالوده}$$

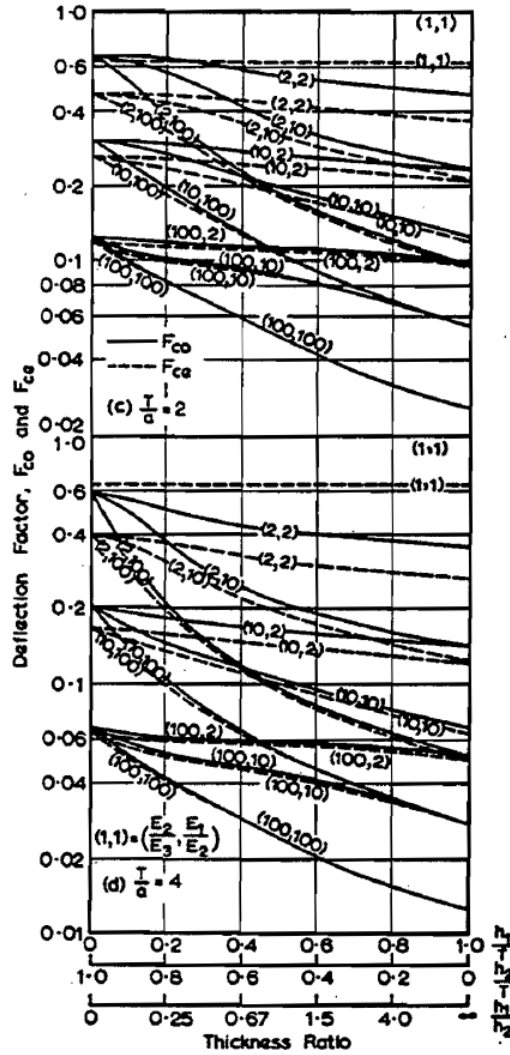
$$S_e = \frac{1.5 pa}{E_3} F_{ce} \quad (۵۴) \quad \text{نشست لبه شالوده}$$



شکل ۵۳ فضای مسئله برای محیط سه لایه



(الف)



(ب)

شکل ۵۴ ضرایب F_{ce} و F_{co} برای سیستم های چند لایه ای به ازای الف) $T/a=0.5, 1$ ب) $T/a=2, 4$

ضرایب تأثیر دیگری برای جابه جایی مرکز شالوده مدور توسط تن و دبارس ارائه گردید (جدول ۱۳). پس از محاسبه ضریب تأثیر، نشست از رابطه زیر بدست می آید:

$$S_c = \frac{1.755 pa}{E_3} F \quad (55)$$

در محاسبه ضریب تأثیر $n_1 = E_1 / E_2$ و $n_2 = E_2 / E_3$ می باشد.

جدول ۱۳: ضریب تأثیر نشست به ازای نسبت های هندسی و نسبت مدول های مختلف

(ب)								(الف)									
n_2	$\frac{h_1/a}{h_2/a}$		0.156	0.312	0.625	1.25	2.5	5	n_2	$\frac{h_1/a}{h_2/a}$		0.156	0.312	0.625	1.25	2.5	5
	h_1/a	h_2/a								h_1/a	h_2/a						
2	0.312	0.858	0.789	0.662	0.510	0.394	-	2	0.312	0.830	0.733	0.556	0.372	0.246	-		
	0.625	0.772	0.717	0.616	0.489	0.387	0.323		0.625	0.745	0.669	0.522	0.359	0.242	0.174		
	1.25	0.669	0.633	0.560	0.460	0.375	0.319		1.25	0.648	0.593	0.476	0.339	0.235	0.172		
	2.5	-	0.564	0.508	0.428	0.360	0.314		2.5	-	0.528	0.430	0.313	0.224	0.168		
	5	-	-	0.470	0.400	0.343	0.306		5	-	-	0.394	0.289	0.211	0.163		
5	0.312	0.747	0.651	0.505	0.352	0.240	-	5	0.312	0.713	0.598	0.427	0.268	0.162	-		
	0.625	0.601	0.537	0.438	0.324	0.231	0.171		0.625	0.572	0.497	0.378	0.250	0.157	0.101		
	1.25	0.449	0.416	0.359	0.284	0.215	0.166		1.25	0.429	0.387	0.312	0.223	0.148	0.0989		
	2.5	-	0.320	0.287	0.240	0.194	0.158		2.5	-	0.299	0.249	0.188	0.134	0.0944		
	5	-	-	0.235	0.202	0.172	0.148		5	-	-	0.202	0.155	0.116	0.0871		
10	0.312	0.664	0.559	0.415	0.274	0.174	-	10	0.312	0.626	0.508	0.350	0.211	0.122	-		
	0.625	0.500	0.436	0.346	0.246	0.165	0.112		0.625	0.469	0.401	0.301	0.195	0.118	0.0712		
	1.25	0.344	0.315	0.267	0.207	0.150	0.108		1.25	0.325	0.291	0.236	0.168	0.109	0.0691		
	2.5	-	0.221	0.198	0.165	0.130	0.100		2.5	-	0.206	0.174	0.134	0.0954	0.0649		
	5	-	-	0.149	0.128	0.108	0.0903		5	-	-	0.130	0.102	0.0779	0.0579		

(د)								(ج)									
n_2	$\frac{h_1/a}{h_2/a}$		0.156	0.312	0.625	1.25	2.5	5	n_2	$\frac{h_1/a}{h_2/a}$		0.156	0.312	0.625	1.25	2.5	5
	h_1/a	h_2/a								h_1/a	h_2/a						
2	0.312	0.811	0.687	0.483	0.298	0.181	-	2	0.312	0.789	0.629	0.411	0.239	0.136	-		
	0.625	0.729	0.630	0.457	0.290	0.178	0.116		0.625	0.711	0.583	0.394	0.234	0.135	0.0809		
	1.25	0.634	0.561	0.420	0.275	0.174	0.115		1.25	0.621	0.523	0.365	0.224	0.132	0.0802		
	2.5	-	0.499	0.379	0.255	0.166	0.112		2.5	-	0.465	0.331	0.209	0.127	0.0788		
	5	-	-	0.346	0.234	0.156	0.109		5	-	-	0.300	0.191	0.120	0.0764		
5	0.312	0.689	0.553	0.369	0.217	0.123	-	5	0.312	0.662	0.501	0.313	0.175	0.0953	-		
	0.625	0.553	0.467	0.334	0.207	0.121	0.0720		0.625	0.535	0.433	0.290	0.169	0.0939	0.0528		
	1.25	0.416	0.367	0.281	0.187	0.115	0.0706		1.25	0.404	0.345	0.250	0.157	0.0909	0.0521		
	2.5	-	0.284	0.225	0.160	0.105	0.0679		2.5	-	0.267	0.202	0.136	0.0846	0.0506		
	5	-	-	0.181	0.130	0.0912	0.0629		5	-	-	0.161	0.112	0.0742	0.0475		
10	0.312	0.601	0.467	0.302	0.172	0.0946	-	10	0.312	0.573	0.419	0.254	0.139	0.0740	-		
	0.625	0.405	0.376	0.267	0.163	0.0924	0.0525		0.625	0.434	0.349	0.232	0.134	0.0729	0.0396		
	1.25	0.312	0.275	0.214	0.144	0.0876	0.0514		1.25	0.301	0.260	0.193	0.123	0.0703	0.0390		
	2.5	-	0.195	0.159	0.117	0.0782	0.0489		2.5	-	0.184	0.145	0.102	0.0645	0.0377		
	5	-	-	0.117	0.0885	0.0642	0.0442		5	-	-	0.106	0.0779	0.0542	0.0348		

(ه)								
n_2	$\frac{h_1/a}{h_2/a}$		0.156	0.312	0.625	1.25	2.5	5
	h_1/a	h_2/a						
2	0.312	0.744	0.538	0.324	0.178	0.0960	-	
	0.625	0.677	0.508	0.314	0.175	0.0953	0.0532	
	1.25	0.594	0.461	0.297	0.170	0.0940	0.0528	
	2.5	-	0.411	0.271	0.161	0.0915	0.0522	
	5	-	-	0.245	0.148	0.0868	0.0509	
5	0.312	0.612	0.421	0.244	0.131	0.0687	-	
	0.625	0.507	0.378	0.233	0.128	0.0681	0.0364	
	1.25	0.387	0.311	0.209	0.122	0.0667	0.0361	
	2.5	-	0.241	0.173	0.110	0.0637	0.0354	
	5	-	-	0.137	0.0915	0.0575	0.0338	
10	0.312	0.524	0.348	0.197	0.104	0.0539	-	
	0.625	0.410	0.305	0.187	0.102	0.0534	0.0280	
	1.25	0.288	0.237	0.164	0.0966	0.0523	0.0277	
	2.5	-	0.169	0.128	0.0847	0.0496	0.0272	
	5	-	-	0.0926	0.0664	0.0436	0.0258	

۳-۲-۲-۱ نیم فضای ناهمگن چند لایه:

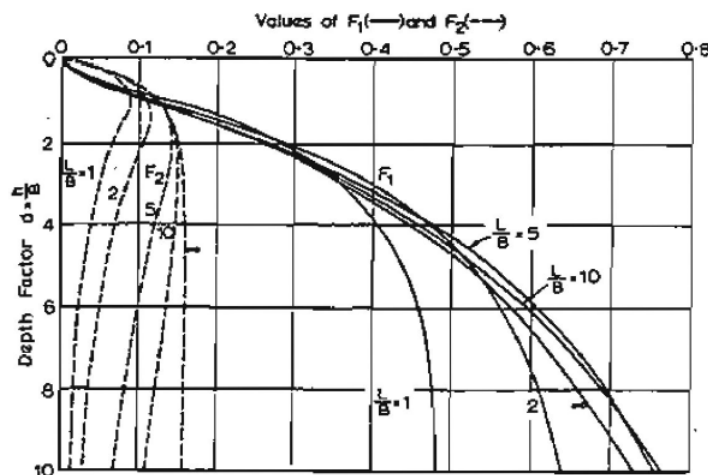
اشتینبرنر روشی را ارائه داد که در آن نشست سطح ناحیه بارگذاری شده با فرض صلب و زیر بودن ناحیه بارگذاری شده و اینکه توزیع تنش برای سیستم چند لایه از توزیع بوسینس تبعیت می کند بدست می آید. این روش ابتدا برای نشست گوشه ناحیه بارگذاری شده مستطیلی برای سیستم یک لایه با ضخامت h ارائه شده بود. نشست گوشه مستطیل به کمک رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S = \frac{pB}{E} I \quad (56)$$

که در آن:

$$I = (1-\nu^2)F_1 + (1-\nu-2\nu^2)F_2 \quad (57)$$

و B طول ضلع کوچکتر مستطیل می باشد.



شکل ۵۵ ضرایب F_1 و F_2 برای محاسبه نشست به روش تقریبی اشتینبرنر

رابطه اشتینبرنر برای نشست سیستم یک لایه را می توان به سیستم های چند لایه تعمیم داد. نشست ناحیه مستطیلی مستقر بر سیستم n لایه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S = pB \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{I_{i+1} - I_i}{E_i} + \frac{I_n}{E_n} \right] \quad (58)$$

که در آن پارامترهای الاستیک لایه i ام و I_i ضریب تأثیر نشست می باشد (شکل ۵۵).

پالمر و باربر روش جدیدی را برای محاسبه نشست سیستم های دو لایه ارائه دادند که قابل تعمیم به سیستم های چند لایه می باشد. در این روش لایه بالایی با ضخامت h مدول الاستیسیته E_1 و نسبت پواسون ν_1 توسط لایه ای به ضخامت h_e و پارامترهای مربوط به لایه پایینی جایگزین می شود که ضخامت این لایه به کمک رابطه زیر بدست می آید:

$$h_e = h \left[\frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)} \right]^{1/3} \quad (59)$$

نشست کلی لایه با اضافه کردن نشست لایه بالایی معادل به ضخامت h_e به نشست لایه پایینی بدست می آید. به عنوان نمونه برای یک پی مدور به شعاع a که بر روی یک سیستم دو لایه با $\nu_1 = \nu_2 = 0.5$ قرار دارد نشست لایه بالایی معادل برابر است با:

$$S_1 = \frac{1.5 pa^2}{E_2 \left[a^2 + h^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \right]^{1/2}} \quad (60)$$

همچنین نشست لایه پایینی برابر می شود با:

$$S_2 = \frac{E_2}{E_1} \left[\frac{1.5 pa}{E_2} - S_1 \right] \quad (61)$$

نشست کل لایه از جمع نشست های دو لایه بدست می آید که برابر است با:

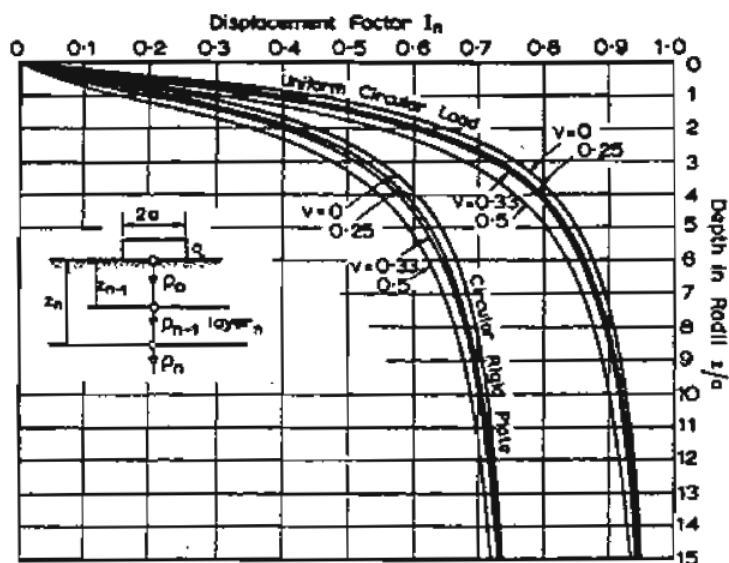
$$S = \frac{1.5 pa}{E_2} \left[\frac{a}{\left[a^2 + h^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \right]^{1/2}} \left(1 - \frac{E_2}{E_1} \right) + \frac{E_2}{E_1} \right] \quad (62)$$

روش پالمر و باربر را می توان به کمک معادل کردن لایه های بالایی با لایه هایی با ضخامت معادل و پارامترهای مشابه پایین ترین لایه به سیستم های چند لایه تعمیم داد.

وسیک نمودارهایی را برای دو حالت شالوده انعطاف پذیر و شالوده صلب با بارگذاری یکنواخت قائم ارائه داد که در آنها از تئوری بوسینس برای توزیع تنش در یک محیط نیم بینهایت استفاده شده است. رابطه لازم برای محاسبه نشست قائم به صورت زیر می باشد:

$$S = p 2a \sum \frac{(1-\nu_n^2)}{E_n} (I_n - I_{n-1}) \quad (63)$$

که در آن p بارگذاری قائم یکنواخت، a شعاع شالوده مدور، ν_n ضریب پواسون لایه و I_n ضریب جابه جایی لایه n ام مطابق با z/a می باشد.



شکل ۵۶ ضرایب نشست برای سیستم های چند لایه

۳-۱- محاسبه نشست برای نیم فضای ناهمسان متقاطع:

ناهمسانی به طور کلی به مشخصه ای از ماده اطلاق می شود که در آن ویژگی های ماده در جهات مختلف متفاوت می باشد. نهشته های طبیعی عمدتاً در جهت قائم رسوب کرده و در معرض تنش های افقی یکسان قرار می گیرند. به عبارت دیگر نهشته های طبیعی دارای تقارن محوری حول محور قائم هستند. بنابراین یک روش رایج در توصیف ناهمسانگردی در نهشته های طبیعی استفاده از فرض ناهمسانی متقاطع^۱ می باشد. با فرض رفتار الاستیک برای اسکلت خاک در کرنشهای کوچک، ناهمسانگردی متقاطع منجر به این می گردد تا پارامترهای ماتریس رفتاری خاک از ۲۱ مؤلفه مستقل به ۵ مؤلفه مستقل E_v ,

E_h , v_{vh} , v_{hh} و G_{vh} کاهش یابد

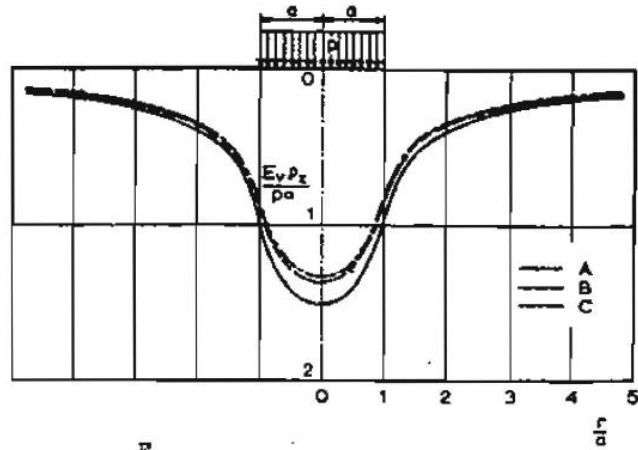
نشست حاصل از یک بار متمرکز در یک محیط ناهمسان متقاطع توسط کونینگ و ارنا و همکاران حل گردید که

رابطه حاصل برای نشست قائم به صورت زیر می باشد:

$$\theta = G_v \quad \rho = \frac{E_v(1-v_h)}{1-v_h - 2v_{vh}^2 \frac{E_v}{E_h}} \quad (64)$$

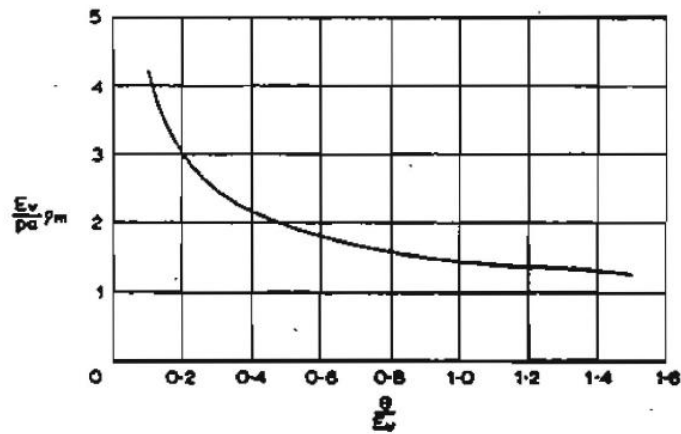
همچنین پروفیل نشست و میانگین آن در نمودارهای زیر که توسط کونینگ ارائه گردیده آمده است.

^۱ Cross Anisotropy



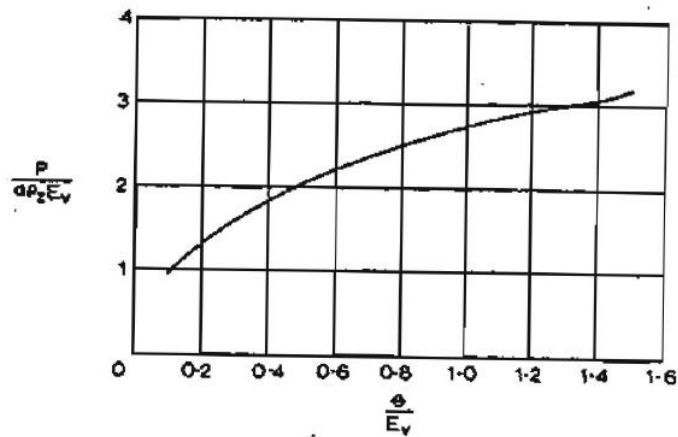
	$\frac{E_h}{E_v}$	ν_{vh}	ν_{hv}	ν_h	$\frac{\theta}{E_v}$	
A	1	1/2	1/2	1/2	0.67	(Boussinesq)
B	2	3/8	3/4	1/8	0.89	
C	4	3/16	3/4	1/8	1.28	

شکل ۵۷ توزیع نشست سطح شالوده مدور



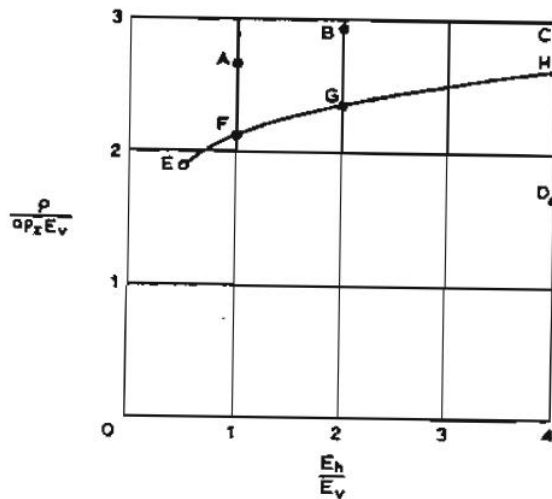
$$\frac{E_h}{E_v} = 4, \nu_{vh} = 3/16, \nu_{hv} = 3/4, \nu_h = 1/8$$

شکل ۵۸ میانگین نشست شالوده مدور



$$\frac{E_h}{E_v} = 4, \quad v_{vh} = 3/16, \quad v_{hv} = 3/4, \quad v_h = 1/8$$

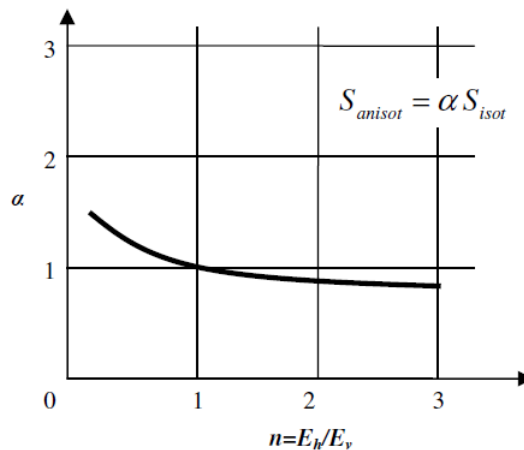
شکل ۵۹ نشست قائم در شالوده مدور صلب



	$\frac{E_h}{E_v}$	v_{vh}	v_{hv}	v_h	$\frac{\theta}{E_v}$	
A	1	1/2	1/2	1/2	0.67	(Boussinesq)
B	2	3/8	3/4	1/8	0.89	
C	4	3/16	3/4	1/8	1.28	
D	4	3/16	3/4	1/8	0.32	
E	1/2	1/6	1/12	3/4	0.60	
F	1	1/4	1/4	1/4	0.80	
G	2	1/6	1/3	1/3	0.90	
H	4	1/12	1/3	1/3	1.20	

شکل ۶۰ نشست قائم در شالوده مدور صلب

باردن نشان داد که نشست نیم فضای ناهمسان متقاطع را می توان به صورت رابطه ای ساده بین نشست ناحیه بارگذاری شده در نیم فضای همسان (S_{isot}) و نیم فضای ناهمسان (S_{anisot}) ارائه داد و ناهمسانی را به صورت یک پارامتر بدون بعد معرفی کرد (شکل ۶۱). همان طور که از شکل پیداست برای مقادیر $n > 1$ (به عنوان نمونه خاکهای رسی بیش تحکیم یافته) مقدار نشست محاسبه شده کوچکتر از مقادیر مربوط به نیم فضای همسانگرد می باشد.



شکل ۶۱ رابطه بین نشست در فضای همسان و ناهمسان متقاطع

۳-۱-۱-۵ نیم فضای غیر خطی:

به هنگام محاسبه نشست ناحیه بارگذاری شده در یک نیم فضای غیر خطی از آنجا که دیگر اصل برهم نهی صادق نمی باشد تأثیرات بارگذاری های متمرکز را نمی توان به راحتی با هم جمع کرد. هونگ نشست صفحه مدور با بارگذاری یکنواخت را که بر روی یک فضای الاستیک غیر خطی قرار داشت مورد محاسبه قرار داد که در این حالت نشست محاسبه شده در حدود یک چهارم حالت فضای الاستیک خطی محاسبه گردید (با E_0 ثابت) که این پدیده اهمیت لحاظ کردن رفتار تنش- کرنش غیر خطی را در محاسبات نشست شالوده های سطحی آشکار می سازد که در محاسبات رایج عمدتاً از آن صرفنظر می گردد. نتایج مشابهی توسط بارز و بولون به کمک روشهای عددی حاصل گردید. در یک نیم فضای غیر خطی تمرکز شدید تغییر شکل های آنی را می توان بلافاصله در زیر ناحیه بارگذاری شده مشاهده کرد. ۹۴٪ نشست صفحه مدور به قطر D تا عمق $1.2D$ یا احتمالاً $1.5D$ متمرکز می باشد.

۲ استفاده از روش های غیر مستقیم (مهندسی):

۱-۲ محاسبه نشست به کمک روش ادمتری:

این روش برای محاسبه نشست، بر پایه تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی استوار است که در آن همه کرنش ها به صورت قائم در نظر گرفته می شود. برای محاسبه نشست تحکیمی، خاک را به لایه هایی با ضخامت کوچک تقسیم کرده و نشست هر لایه را محاسبه و با هم جمع می کنیم. ابتدای لایه اول بایستی بر زیر پی منطبق بوده و انتهای لایه آخر در عمقی قرار داشته باشد که در آن $\Delta\sigma_z < 0.1\sigma'_{z0}$ باشد. از آنجا که توزیع کرنش در عمق به صورت غیرخطی است، هر چه تعداد لایه ها بیشتر باشد نتایج حاصله دقیق تر خواهد بود. فرمول های محاسبه نشست در این روش به قرار زیر است:

الف) برای خاک های عادی تحکیم یافته:

$$S_c = \sum \frac{C_c}{1+e_0} H \text{Log} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} \right) \quad (65)$$

ب) برای خاک پیش تحکیم یافته: ($\sigma'_f < \sigma'_p$)

$$S_c = \sum \frac{C_r}{1+e_0} H \text{Log} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} \right) \quad (66)$$

ج) برای خاک پیش تحکیم یافته: ($\sigma'_f > \sigma'_p$)

$$S_c = \sum \left[\frac{C_r}{1+e_0} H \text{Log} \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right) + \frac{C_c}{1+e_0} H \text{Log} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_p} \right) \right] \quad (67)$$

۲-۲ محاسبه نشست به کمک روش اسکمپتون و بیروم:

اسکمپتون و بیروم نشان دادند که میزان اضافه فشار آب حفره ای بر اثر اعمال فشار یکسان در خاک های مختلف متفاوت بوده و به جنس خاک بستگی دارد. از این رو میزان نشست تحکیمی بر اثر اعمال فشار یکسان در خاک های مختلف متفاوت خواهد بود. علی رغم این مسئله، تفاوتی در نتایج ارائه شده توسط آزمایش تحکیم ادمتری دیده نمی شود. علت این امر این است که در دستگاه ادمتری، آزمایش بدون کرنش جانبی انجام می شود و در این شرایط فشار آب حفره ای ایجاد شده دقیقاً برابر فشار اعمالی بر توده خاک بوده و مستقل از نوع خاک است و تنها به اشباع بودن کامل خاک بستگی دارد.

برای محاسبه نشست تحکیمی به روش اسکمپتون و بیروم المان کوچکی از خاک در زیر شالوده و بر روی محور تقارن آن در نظر گرفته می شود. فشار آب حفره ای ایجاد شده بر اثر بارگذاری در این المان برابر است با:

$$u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (68)$$

که در آن A و B پارامترهای فشار آب حفره‌ای اسکمپتون هستند. برای خاک رس اشباع $B=1$ می‌باشد. میزان پارامتر A برای یک نوع خاک رس عمدتاً به تاریخچه تنش خاک وابسته است.

از آنجا که در این المان کرنش‌های جانبی اتفاق نمی‌افتد، نشست تحکیمی آن را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$d\delta_c = m_v u dz \quad (69)$$

که در آن dz ارتفاع المان و m_v ضریب تراکم پذیری خاک در آزمایش ادومتری است. با جایگزین کردن u از فرمول ۳۲ و انتگرال گیری در عمق زیر شالوده بدست می‌آید:

$$\delta_c = \int_0^z m_v \Delta\sigma_1 \left[A + \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_1} (1-A) \right] dz \quad (70)$$

که می‌توان رابطه فوق را به صورت $\delta_c = \mu \delta_{oed}$ نوشت. که در آن:

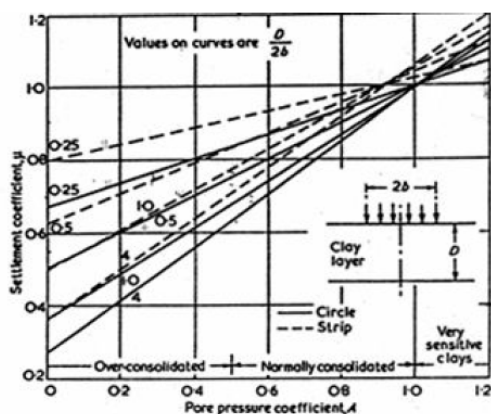
$$\mu = \frac{\int_0^z m_v \Delta\sigma_1 \left[A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} (1-A) \right] dz}{\int_0^z m_v \Delta\sigma_1 dz} \quad (71)$$

با فرض اینکه m_v و A با عمق ثابت هستند معادله ۷۱ را می‌توان به صورت شکل ساده زیر نوشت:

$$\mu = A + \alpha(1-A) \quad (72)$$

$$\alpha = \frac{\int_0^z \Delta\sigma_3 dz}{\int_0^z \Delta\sigma_1 dz} \quad \text{که در آن:}$$

در صورتی که مقدار ضریب پواسون را برای همه خاک‌های رس اشباع برابر ۰/۵ در نظر بگیریم مقدار α تنها به هندسه مسئله وابسته می‌گردد.



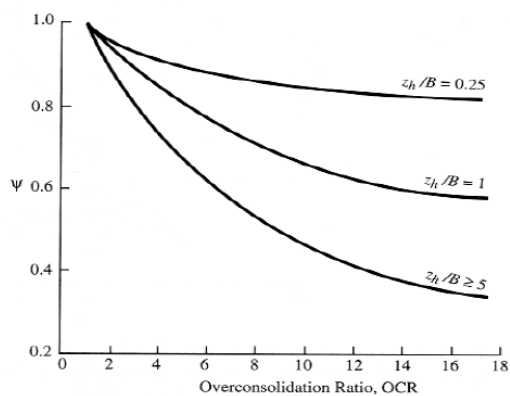
نمودار ۶۲ تغییرات ضریب نشست، u با ضریب فشار آب حفره ای، A

به طور کلی برای محاسبه نشست به روش اسکمپتون و بیروم از فرمول زیر استفاده می شود:

$$\delta = \delta_d + \psi \delta_c \quad (73)$$

که در آن δ_d نشست آنی می باشد که برای محاسبه آن از تئوری الاستیسیته استفاده می شود، δ_d نشست تحکیمی و ψ ضریبی است که ضریب اسکمپتون و بیروم نامیده می شود و می توان آن را از شکل ۶۳ بدست آورد.

روش ارائه شده توسط اسکمپتون و بیروم نشست را برای خاک های رسی عادی تحکیم یافته کمتر از مقدار واقعی و برای خاک های رسی بیش تحکیم یافته بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند.

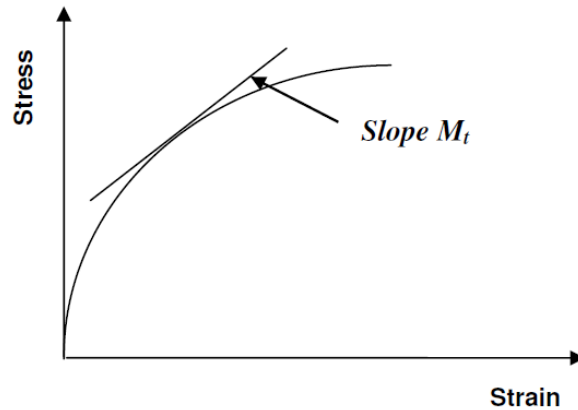


نمودار ۶۳ تغییرات ضریب اسکمپتون و بیروم با نسبت بیش تحکیمی

۳-۲ محاسبه نشست به کمک روش مدول مماسی:

همان طور که در شکل ۶۴ نشان داده شده است منحنی تنش- کرنش خاک در حالت کلی به صورت غیر خطی بوده به طوری که نرخ افزایش تنش در مقابل کرنش با افزایش تنش کم می شود. شیب منحنی تنش- کرنش مدول مماسی، M_t نامیده شده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$M_t = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (74)$$



شکل ۶۴ تغییرات مدول مماسی در نمودار تنش- کرنش

جانپو رابطه زیر را برای مدول مماسی ارائه داد:

$$M_t = m \sigma_r \left(\frac{\sigma'}{\sigma_r} \right)^{(1-f)} \quad (75)$$

که در آن m, f پارامترهای بدون بعد بوده که به نوع خاک بستگی داشته و σ_r تنش مرجع (100 KPa) است.

برای محاسبه تنش های ایجاد شده در خاک داریم:

$$\varepsilon = \int_{\sigma'_0}^{\sigma'_1} \frac{1}{M_t} d\sigma' \rightarrow \varepsilon = \frac{1}{mf} \left[\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_r} \right)^f - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_r} \right)^f \right] \quad (76)$$

در صورتی که $f = 0$ باشد:

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \text{Ln} \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} \right) \quad (77)$$

مقادیر m ، f را می توان از نتایج آزمایشات رایج صحرایی یا آزمایشگاهی بدست آورد. در صورتی که $f = 0$ باشد که برای خاک های ریز دانه معمول است، نمودار کرنش در مقابل لگاریتم فشار، حالت خطی پیدا می کند. در این حالت رابطه زیر بین m ، m_r ، C ، C_r برقرار است:

$$m = (Ln 10) \left(\frac{1 + e_0}{C_c} \right) \quad (78)$$

و

$$m = (Ln 10) \left(\frac{1 + e_0}{C_{cr}} \right) \quad (79)$$

برای خاک های رسی بیش تحکیم یافته مشابه رابطه ای که در روش کلاسیک ارائه شد، از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} Ln \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right) + \frac{1}{m} Ln \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_p} \right) \quad (80)$$

مقادیر f ، m به طور کلی به نوع خاک، تراکم و مقاومت آن بستگی دارند. گستره پارامتر های فوق در جدول زیر آمده است.

جدول ۱۴ مقادیر f ، m برای انواع خاکها

انواع خاک ها	f	m
شن	0.5	40 – 400
متراکم	0.5	250 – 400
متوسط ماسه	0.5	150 – 400
شل	0.5	100 – 150
متراکم	0.5	80 – 200
متوسط سیلت	0.5	60 – 80
شل	0.5	40 – 60
سخت	0	20 – 60
متوسط تا سفت رس	0	10 – 20
نرم تا متوسط	0	5 – 10
خاک آلی	0	1 – 5

۴-۲ محاسبه نشست به کمک روش مسیر تنش:

مسیر تنش خطی است که یکسری نقطه را به هم وصل می کند که هر نقطه نشان دهنده حالت تنش تجربه شده توسط خاک در حین پیشرفت آزمایش است.

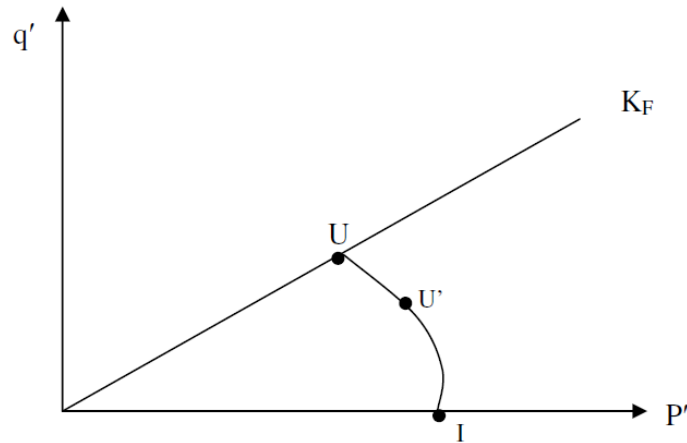
لمب نوعی نمایش مسیر تنش را پیشنهاد کرد که نمودار q' را در مقابل p' ترسیم می کند. روابط مربوط به q' و p' به شرح

زیر است:

$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (81)$$

این نوع مسیر تنش برای رس عادی تحکیم یافته و آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده، CU در شکل ۶۵ نشان داده شده است که در آن F' پوش گسیختگی اصلاح شده نامیده می شود و شیب آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$\tan \alpha = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (82)$$



شکل ۶۵ مسیر تنش p' - q' برای آزمایش CU

در لحظه شروع اعمال تنش انحرافی $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_3$ می باشد. بنابراین $p' = \sigma'_3$ و $q' = 0$ است. مقادیر فوق بوسیله نقطه I در روی شکل نشان داده شده است. در مرحله ای از اعمال تنش انحرافی خواهیم داشت:

$$\sigma'_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d - \Delta u_d$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u_d$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = \sigma_3 + \frac{\Delta\sigma_d}{2} - \Delta u_d \quad (83)$$

$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\Delta\sigma_d}{2}$$

مقادیر q' و p' بدست آمده نقطه U' را در شکل ۶۵-۲ مشخص می نماید. در لحظه گسیختگی نمونه خواهیم داشت:

$$p' = \sigma_3 + \frac{(\Delta\sigma_d)_f}{2} - (\Delta u_d)_f \quad (۸۴)$$

$$q' = \frac{(\Delta\sigma_d)_f}{2}$$

مقادیر فوق نقطه U را نمایش می دهد. بنابراین منحنی $IU'U$ مسیر تنش مؤثر در یک آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده است.

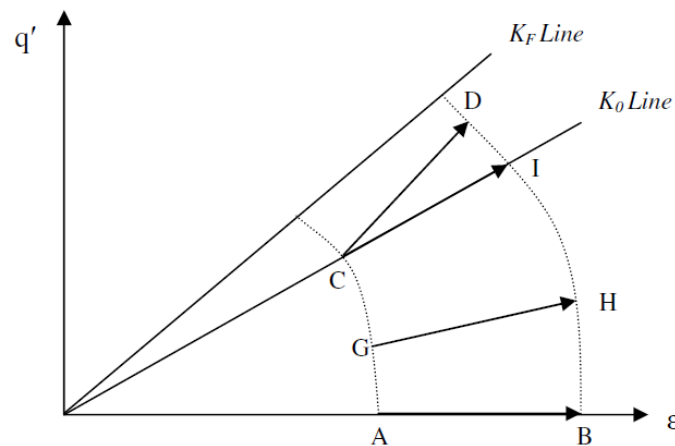
توجه شود که نقطه U در روی پوش گسیختگی اصلاح شده، F' که زاویه α با افق می سازد قرار دارد.

در محاسبه نشست به کمک مسیر تنش فرض می شود که برای خاکهای عادی تحکیم یافته تغییر حجم بین هر دو نقطه مفروض

در نمودار q' نسبت به p' مستقل از مسیر تنشی می باشد که نتیجه می شود. این موضوع در شکل ۶۶ توضیح داده شده است.

برای مثال برای نمونه خاک، تغییر حجم در مسیرهای تنش AB ، GH ، CD و CI با هم مساویست. اما تغییر شکل های نسبی

محوری متفاوت خواهد بود. اینک با این فرض اساسی می توان اقدام به محاسبه نشست نمود.



شکل ۶۶. تغییر حجمهای مساوی با تغییر شکل های نسبی متفاوت

به جهت فهم آسان مسئله، روش محاسبه نشست به کمک یک مثال توضیح داده می شود. به منظور محاسبه نشست در خاکهای

رسی عادی تحکیم یافته، نمونه های دست نخورده از عمق های مشخصی به دست آورده شده است. آزمایش های سه محوری

تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی این نمونه ها در فشارهای همه جانبه مختلف، σ_3 همراه با آزمایش تحکیم یک بعدی استاندارد

انجام گرفته است. نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی استاندارد، مقادیر نشانه تراکم پذیری C_c را به ما خواهد داد. برای مثال فرض کنید شکل ۶۷ نمایشگر منحنی های تنش - تغییر شکل نسبی برای یک نمونه خاک رس عادی تحکیم یافته که از یک عمق متوسط لایه رسی حاصل شده است، باشد. همچنین فرض کنید که $e_0=0.9$ و $C_c=0.25$ و زاویه اصطکاک زهکشی شده، ϕ که از آزمایش CU محاسبه شده است برابر 30° درجه باشد. شیب خط K_0 که نشانگر وضعیت طبیعی نمونه می باشد از رابطه زیر بدست می آید:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{1 - K_0}{1 + K_0} \right) \quad (85)$$

9

$$K_0 = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 30 = 0.5 \quad \Rightarrow \quad \beta = 18.43^\circ$$

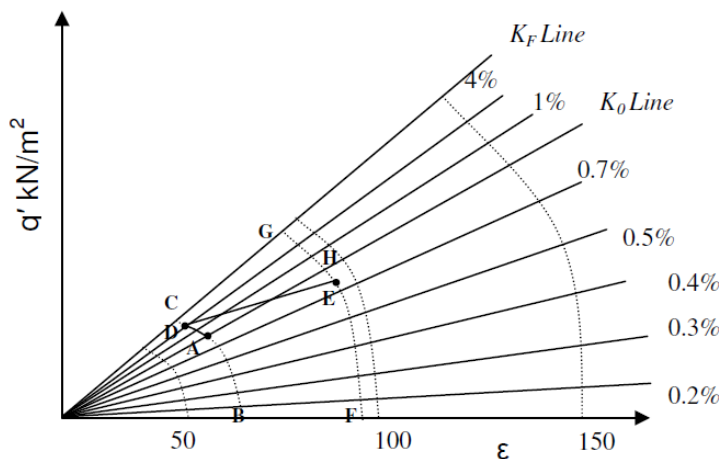
با معلوم شدن مقدار β حال می توان خط K_0 را ترسیم کرد. همچنین شیب خط K_F که بیانگر وضعیت گسیختگی نمونه است از رابطه زیر بدست می آید:

$$\alpha = \tan^{-1}(\sin \phi) = 26.57^\circ$$

نشست در لایه رسی را برای شرایط زیر محاسبه می کنیم:

(۱) متوسط فشار مؤثر سربار برابر $\sigma'_1 = 75 \text{ kN/m}^2$ می باشد.

(۲) کل ضخامت لایه رسی $H_r = 3 \text{ m}$ می باشد.



شکل ۶۷ منحنی های تنش - تغییر شکل نسبی برای یک نمونه خاک رس عادی تحکیم یافته

به علت بنا کردن سازه، افزایش تنش های اصلی بیشینه و کمینه در عمق متوسط برابرند با:

$$\Delta\sigma_1 = 40 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_3 = 25 \text{ kN/m}^2$$

فرض می شود که بار به طور آبی وارد می شود. تنش اصلی کمینه (فشار در حالت سکون) برابر است با:

$$\sigma'_3 = K_0 \sigma'_1 = 37.5 \text{ kN/m}^2$$

از این رو قیل از بارگذاری،

$$p' = \frac{75 + 37.5}{2} = 56.25 \text{ kN/m}^2$$

از آنجا که مسیرهای تنش به طور هندسی مشابه هستند می توانیم مسیر تنش BAC که از نقطه A می گذرد را رسم کنیم.

همچنین از آنجا که بارگذاری به طور آبی اعمال شده است (حالت زهکشی نشده) حالت تنش در رس که به وسیله نمودار p' نسبت

به q' بلافاصله بعد از بارگذاری بیان می شود روی مسیر تنش BAC خواهد بود. بلافاصله بعد از بارگذاری داریم:

$$\sigma_1 = 75 + 40 = 115 \text{ kN/m}^2 \quad \sigma_3 = 37.5 + 25 = 62.5 \text{ kN/m}^2$$

$$q' = \frac{115 - 62.5}{2} = 26.25 \text{ kN/m}^2$$

با این مقدار q' می توانیم محل نقطه D را پیدا کنیم. در پایان تحکیم خواهیم داشت:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = 115 \text{ kN/m}^2 \quad \sigma'_3 = \sigma_3 = 62.5 \text{ kN/m}^2$$

$$p' = \frac{115 + 62.5}{2} = 88.75 \text{ kN/m}^2 \quad \text{and} \quad q' = 26.25 \text{ kN/m}^2$$

مقادیر اخیر p' و q' با نقطه E نشان داده شده است. منحنی FEG مسیر تنشی است که از نقطه E به طور مشابه با منحنی BAC

رسم شده است. ADE نیز مسیر تنش مؤثری است که برای جز حجم خاک در عمق متوسط لایه رسی اتفاق خواهد افتاد. AD

بیانگر نشست ارتجاعی و DE نیز بیانگر نشست تحکیمی می باشد.

برای نشست ارتجاعی (مسیر تنش A تا D) داریم؛

$$S_e = [(\varepsilon_1 \text{ at } D) - (\varepsilon_1 \text{ at } A)] H_t = (0.04 - 0.01)3 = 0.09 \text{ m}$$

برای نشست تحکیمی (مسیر تنش D تا E) نیز بر اساس فرض قبلی، تغییر شکل نسبی حجمی بین D و E برابر تغییر شکل نسبی

حجمی بین A و H می باشد. توجه داشته باشید که H روی خط K_0 واقع است. برای نقطه A ، $\sigma'_1 = 75 \text{ kN/m}^2$ و برای نقطه H

$\sigma'_1 = 118 \text{ kN/m}^2$ می باشد و لذا تغییر شکل نسبی حجمی، ε_v برابر است با:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{C_c \text{Log}(118/75)}{1 + 0.9} = 0.026$$

تغییر شکل نسبی محوری، ε_1 در امتداد مسیر تنش افقی در حدود یک سوم تغییر شکل نسبی حجمی در امتداد خط K_0 می باشد و یا:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{3} \varepsilon_v = \frac{1}{3} (0.026) = 0.0087$$

از این رو نشست تحکیمی برابر است با:

$$S_c = 0.0087 H_t = 0.0087 (3) = 0.0261m$$

و بنابراین نشست کل برابر

$$S_e + S_c = 0.116m$$

خواهد بود.

۲-۵ محاسبه نشست به کمک روش سطوح مرزی وضعیت:

مشابه روش مسیر تنش، روش سطوح مرزی وضعیت^۱ توسط بورلند و روس ارائه گردید که حیات خود را از وضعیت تنش در یک نیم فضای خطی شروع کرد (البته با اصلاحات مشخص). تغییر شکل ها به کمک روابط ساختاری که از تئوری سطوح مرزی وضعیت خاکهای رسی عادی تحکیم یافته که توسط گروه کمبریج به سرپرستی دکتر روسکو ارائه گردید بدست می آیند. اگر چه مشابه روش مسیر تنش این روش به طور کامل تحلیلی نمی باشد اما نتایج قابل قبولی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه کرده است.

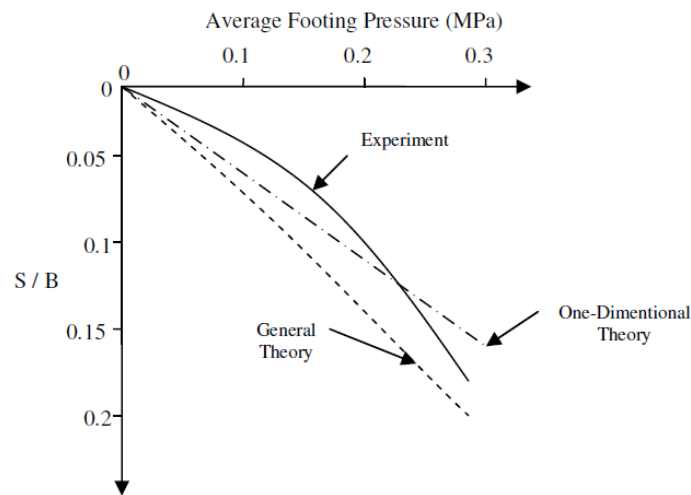
در مقایسه با روش مسیر تنش، تغییر شکلها به کمک رابطه تئوریک بین تنش و کرنش (الاستوپلاستیک یا برای سادگی پلاستیک) توسط چندین پارامتر فیزیکی خاک (در ساده ترین حالت شاخص فشاری، C_c و زاویه اصطکاک بیشینه، ϕ_f) محاسبه می گردد. از لحاظ تئوریک این روش تنها در مورد رسهای عادی تحکیم یافته که در آنها مقادیر زاویه اصطکاک بیشینه نزدیک به زاویه اصطکاک پسماند می باشد و تغییر حجم ایجاد شده منفی یا ناچیز است و بیشتر در مسائل کرنش صفحه ای کاربرد دارد.

محاسبه وضعیت تنش اجازه پیدایش نواحی پلاستیک را در خاک زیرین می دهد. تنش قائم که بر اساس یافته های هوک و همکاران و مورگنسترن و فوکان تحت تأثیر نواحی پلاستیک قرار نمی گیرد را می توان به کمک تئوری الاستیسیته خطی بدست آورد. دو مؤلفه دیگر تانسور تنش از شرایط سختی و تغییر ناپذیری جهت تنش های اصلی بدست می آید در

¹ State Boundary Surface

مورد افزایش تنش های ایجاد شده در نتیجه افزایش بارگذاری، افزایش کرنش های ایجاد شده در نقاط مختلف خاک زیرین را می توان به کمک روابط ساختاری که از سطوح مرزی وضعیت حاصل می شود، بدست آورد. این سطوح بر پایه یافته های تجربی، (به عنوان مثال قانون لگاریتمی تراکم پذیری) فرضیاتی در مورد استهلاك انرژی به هنگام تغییر شکل، وجود سطوح تسلیم با سخت شوندگی همسانگرد، صادق بودن قانون تعامد در مورد خاکهای رسی عادی تحکیم یافته و ... حاصل شده اند.

شکل ۶۸ مقایسه ای بین مقادیر کرنش های محاسبه شده و مقادیر کرنش های اندازه گیری شده در یک شالوده نواری مستقر بر روی بستر رسی را نشان می دهد. محاسبات به کمک تئوری عمومی روش سطوح مرزی وضعیت (خط چین) و روش ادومتری (خط و نقطه) انجام گردیده است. مقایسه انجام شده نشان می دهد که تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات حاصل از این تئوری وجود دارد.



شکل ۶۸ جابه جایی قائم شالوده نواری شکل مستقر بر بستر رسی

مزیت عمده محاسبات به کمک این تئوری این است که بکار بردن آن تنها نیاز به چندین پارامتر فیزیکی اساسی خاک بستر دارد که به آسانی توسط روشهای آزمایشگاهی قابل اندازه گیری می باشد.