



جامعة حلب  
كلية الهندسة المدنية  
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

## تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية

إعداد المهندسة  
زهرة أتش أوغلي



جامعة حلب  
كلية الهندسة المدنية  
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية

إعداد المهندسة  
زهرة أنثى أوغلي

المشرف المشارك  
الدكتور المهندس علاء كردي  
مدرس في قسم الهندسة الجيوتكنيكية  
كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب

المشرف  
الدكتور المهندس نوار كعدان  
أستاذ في قسم الهندسة الجيوتكنيكية  
كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب

## ﺗﺼﺮﯨﺢ

أﺻﺮﺡ ﺑأن ﻫﺬﻩ ﺭﺳﺎﻟﺔ:

"ﺗﺤﻠﯩﻞ ﺍﺳﺘﻘﺮﺍﺭ ﺍﻟﻤﻨﺤﺪﺭﺍﺕ ﺑﺎﺳﺘﺨﺪﺍﻡ ﺗﺮﯨﻘﺔ ﺗﺨﻔﯩﺰ ﻣﻘﺎﻭﻣﺔ ﺍﻟﻘﺼ"

ﻟﻢ ﻳﺴﺒﻖ أن ﻗﺒﻠﺖ ﻟﻠﺤﺼﻮﻝ ﻋﻠﻰ ﺃﻳﺔ ﺷﻬﺎﺩﺓ ، ﻭﻻ ﻫﻲ ﻣﻘﺪﻣﺔ ﺣﺎﻟﯩﺌﺎً ﻟﻠﺤﺼﻮﻝ ﻋﻠﻰ ﺷﻬﺎﺩﺓ ﺃﺧﺮﻯ.

ﺍﻟﻤﺮﺷﺤﺔ

ﺍﻟﻤﻬﻨﺪﺳﺔ ﺯﻫﺮﺓ ﺃﺗﺶ ﺃﻭﻏﻠﻲ

## شهادة

نشهد بأن العمل الموصوف بهذه الرسالة هو نتيجة بحث علمي قامت به المرشحة المهندسة زهرة أتش أوغلي تحت إشراف الدكتور المهندس نوار كعدان الأستاذ في قسم الهندسة الجيوتكنيكية في كلية الهندسة المدنية بجامعة حلب و الدكتور المهندس علاء كردي المدرس في قسم الهندسة الجيوتكنيكية في كلية الهندسة المدنية بجامعة حلب. و أي رجوع لأي بحث آخر في هذا الموضوع موثق في النص.

الباحثة المهندسة

زهرة أتش أوغلي

المشرف

الدكتور المهندس نوار كعدان

المشرف المشارك

الدكتور المهندس علاء كردي

نوقشت هذه الرسالة وأجيزت بتاريخ / / 2011

### لجنة الحكم

عضو  
المشرف الأستاذ الدكتور  
نوار كعدان

عضو  
الأستاذ الدكتور  
معن هلال

رئيساً  
الأستاذ الدكتور  
نضال شحادة

## الملخص

إن مشكلة توازن المنحدرات تعتبر من المسائل الرئيسية التي تواجه العاملين في مجال ميكانيك التربة، فقد حازت هذه المشكلة على اهتمام المهندسين و الباحثين الجيوتكنيكيين منذ عشرينيات القرن الماضي، الذين قدموا مجموعة من طرق توازن المنحدرات و التي تعتمد في أساسها على تقسيم سطح الانزلاق المفترض إلى مجموعة من الشرائح و دراسة توازن الشرائح الذي يختلف من طريقة لأخرى بحسب فرضيات القوى المؤثرة على كل شريحة و ميل هذه القوى، و هذا ما يميز كل طريقة عن الأخرى. أما في حالة تحليل استقرار المنحدرات وفق طريقة تخفيض مقاومة القص Shear Strength Reduction SSR، و التي تعتمد على تحليل استقرار المنحدر المدروس باستخدام طريقة العناصر المحدودة و التي تعتمد على تحليل الإجهادات و الانفعالات التي يتعرض لها المنحدر و عن طريق تخفيض قيم مقاومة القص من تماسك و احتكاك سيصل المنحدر إلى درجة لا يمكن أن يتم فيها تحليل استقراره باستخدام طريقة العناصر المحدودة عند ها ستكون الانتقالات كبيرة في المنحدر و سيحدث انهيار المنحدر و بالتالي سنحصل على قيمة عامل الأمان للمنحدر المدروس دون الحاجة إلى تحديد شكل أو مكان سطح الانزلاق و كذلك الأمر بالنسبة للقوى الجانبية المؤثرة على الشرائح و ميولها، فقد تم في هذا البحث "تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص" و ذلك بتطبيقها على منحدر متجانس من ناحيتين:

أولاً: من الناحية التصميمية للمنحدر و مدى تأثير النسبة H/L على عامل الأمان المحسوب باستخدام طريقة SSR.

ثانياً: من الناحية الميكانيكية: حيث تم تغيير المتحولات الخمسة و الداخلة في حساب عامل الأمان باستخدام تقنية العناصر المحدودة من (تماسك، احتكاك، كثافة، عامل مرونة، عامل بواسون) و مدى تأثيرها على عامل الأمان.

تم ربط النتائج التي حصلنا عليها للوصول إلى نموذج رياضي يمكن من خلاله حساب عامل الأمان لمنحدر متجانس تتغير فيه قيم العوامل المؤثرة على عامل الأمان و ذلك باستخدام طريقة التصميم التجريبي Design Of Experiment DOE و التي تعتمد على تغير قيم عوامل التصميم عن طريق مستويات الدراسة لمعرفة مدى تأثير كل عامل من عوامل التصميم على عامل الأمان ثم معرفة مدى التداخل بين عاملين أو أكثر من عوامل التصميم و تأثيره على عامل الأمان.

## الفهرس

I	ملخص
II	الفهرس
VI	الجداول
VII	الأشكال التوضيحية
1	<b>الفصل الأول: مقدمة عامة</b>
1	1-1 مقدمة
1	2-1 أهمية البحث
1	3-1 الغاية من البحث
3	4-1 خطوات البحث
4	<b>الفصل الثاني: عرض لبعض طرق استقرار المنحدرات</b>
4	1-2 مقدمة
4	2-2 أساسيات تحليل استقرار المنحدرات
6	3-2 طرق استقرار المنحدرات
7	1-3-2 أولاً: طرق التوازن الحدّي
7	1-1-3-2 طريقة الشرائح التقليدية
8	2-1-3-2 طريقة Bishop المبسطة
9	3-1-3-2 طريقة توازن القوى والطريقة السويدية المعدلة
13	4-1-3-2 طريقة Spencer
13	5-1-3-2 طريقة Wedge
14	6-1-3-2 طريقة المنحدر اللامتاهي
16	2-3-2 ثانياً: طرق التقريبات البسيطة
16	1-2-3-2 طريقة دفع التربة في حالة الراحة
16	2-2-3-2 طرق قدرة التحمل
18	<b>الفصل الثالث: النمذجة العددية</b>
18	1.3 مقدمة
19	2-3 النمذجة في الهندسة الجيوتكنيكية
21	3-3 الغاية من استخدام النموذج العددي
21	1-3-3 الحصول على قيم ونتائج
21	2-3-3 مقارنة النتائج
21	3-3-3 تحديد العوامل الأساسية

22	4-3-3 تفسير العمليات الفيزيائية
25	4-3 كيفية بناء النموذج
25	1-4-3 فرض تصور أو لي
26	2-4-3 تبسيط النموذج
27	3-4-3 البداية بالأبسط
28	4-4-3 التحقق العددي
28	5-4-3 الاعتماد بداية على قيم تقديرية للخصائص
29	6-4-3 فحص (تحليل) النتائج
29	7-4-3 تقييم النتائج ضمن سياق القيم المتوقعة
29	4-4 كيفية الاستغناء عن النموذج
31	<b>الفصل الرابع: طريقة العناصر المحدودة وتقنية تخفيض مقاومة القص</b>
31	1-4 مقدمة
31	2-4 التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة
32	3-4 النظرية الأساسية لحل المسائل المستوية
33	4-4 استخدام طريقة العناصر المحدودة في حل المسائل المستوية
33	5-4 أنواع العناصر المحدودة المستوية
33	1-5-4 مثلث الانفعال الثابت CST or T3
33	2-5-4 مثلث الانفعال الخطي LST or T6
34	3-5-4 عنصر خطي رباعي الأضلاع (Q4)
34	4-5-4 عنصر خطي رباعي الأضلاع تربياعي (Q8)
35	6-4 طريقة العناصر المحدودة في الهندسة الجيوتكنيكية
35	7-4 تقنية تخفيض مقاومة القص
36	8-4 العوامل المؤثرة على استقرار المنحدرات باستخدام SSR
36	1-8-4 أولاً: خواص مواد نموذج المنحدر
37	2-8-4 ثانياً: عامل الأمان وعامل تخفيض مقاومة القص
38	3-8-4 ثالثاً: انهيار المنحدر
38	9-4 استخدام طريقة العناصر المحدودة في التحليل الستاتيكي للمسألة المدروسة
38	10-4 عملية الحل، التقارب و معيار التوقف
41	<b>الفصل الخامس: البرامج المستخدمة والنماذج المدروسة</b>
41	1-5 برنامج PHASE <sup>2</sup>
42	2-5 مرحلة تحضير النموذج



42	3-5 مرحلة إدخال النموذج
42	Boundaries 1-3-5 حدود النموذج
43	Meshing 2-3-5 إسناد خيار الشبكة
43	Discretize 1-2-3-5 المرحلة الأولى
43	Mesh 2-2-3-5 المرحلة الثانية
44	Boundary Conditions 3-3-5 الشروط الحدية (شروط الاستناد)
44	Field Stress 4-3-5 الإجهادات الحقلية
44	Material Properties 5-3-5 خواص المواد
45	Compute 4-5 مرحلة حساب النموذج
45	5-5 مرحلة إظهار النتائج
45	Interpret 1-5-5 تفسير نتائج النموذج
48	6-5 النموذج المدروس باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص باستخدام تقنية العناصر المحدودة
52	7-5 برنامج 5 Slide
52	8-5 مرحلة تحضير النموذج
52	9-5 مرحلة إدخال النموذج
52	Boundaries 1-9-5 حدود النموذج
53	Slip Surfaces 2-9-5 سطوح الانزلاق
54	Slope Limits 3-9-5 حدود المنحدر
56	Properties 4-9-5 خواص المواد
56	Analysis Methods 5-9-5 طرق التحليل
57	10-5 مرحلة إظهار النتائج
58	11-5 النموذج المدروس باستخدام برنامج 5 Slide
59	12-5 أولاً : دراسة المنحدر من الناحية التصميمية
64	13-5 ثانياً: دراسة المنحدر من الناحية الميكانيكية
71	<b>الفصل السادس: تقييم النتائج باستخدام طريقة المخططات التجريبية الكاملة وتقنية تخفيض مقاومة القص للمنحدرات المتجانسة</b>
71	1-6 مقدمة
71	2-6 مبدأ طريقة التصميم التجريبي (DOE)
72	3-6 تطبيقات التصميم التجريبي DOE في التصميم الهندسي
72	4-6 استخدام طريقة التصميم التجريبي في دراسة استقرار المنحدرات
88	

## الفصل السابع: النتائج و التوصيات

88	1-7 النتائج
90	2-7 التوصيات
91	<b>الملحق A: مفاهيم أساسية عن التصميم التجريبي</b>
91	1-A مقدمة
91	2-A إستراتيجية التجريب: Strategy of Experimentation
92	3-A التصميم الإحصائي للتجارب:
93	4-A المبادئ الرئيسية للتصميم الإحصائي للتجارب
93	5-A أنواع المتغيرات Types of Variables:
94	1-6-A الفضاء(المجال) التجريبي Experimental Space
94	2-6-A مجال العامل Factor Domain
95	3-6-A مجال الدراسة Study Domain
96	4-6-A المتغيرات المركزية والمقيسة CSV Centered and Scaled Variables
97	5-6-A النقاط التجريبية Experimental Points
98	7-A المنهجية العملية للتصميم التجريبي A practical methodology for DOE
100	8-A المخططات التجريبية العاملية Factorial Experiment Plans
107	<b>المراجع</b>

## الجدول

رقم الصفحة	الجدول	الرقم
6	الجدول (1-2) المجاهيل والمعادلات في طرق التوازن الحدي	1
15	الجدول (2-2) مقارنة بين طرق التوازن الحدي	2

## الأشكال التوضيحية

الرقم	الشكل	الرقم
5	الشكل (1-2) شريحة نموذجية والقوى المؤثرة عليها باستخدام طريقة الشرائح	1
7	الشكل (2-2) شريحة نموذجية والقوى المؤثرة عليها باستخدام طريقة OMS	3
9	الشكل (3-2) القوى المؤثرة على شريحة باستخدام طريقة Bishop	4
10	الشكل (4-2) القوى المؤثرة على شريحة باستخدام الطريقة السويدية المعدلة	5
12	الشكل (5-2) مضع القوى المؤثرة على شريحة باستخدام الطريقة السويدية المعدلة	6
14	الشكل (6-2) مضع القوى المؤثرة على شريحة باستخدام طريقة Wedge	7
15	الشكل (7-2) المنحدر اللامتاهي	8
16	الشكل (8-2) طريقة دفع التربة في حالة الراحة	9
17	الشكل (9-2) طرق قدرة التحمل	10
19	الشكل (1-3) مثلث (Burland) [3]	11
20	الشكل (2-3) مثلث (Burland) المحسن [3]	12
22	الشكل (3-3) حالتين محتملتين لشكل الغطاء الترابي [3]	13
23	الشكل (4-3) تابع النفوذية [3]	14
23	الشكل (5-3) انحراف الجريان تحت معدل التسرب المنخفض [3]	15
24	الشكل (6-3) انحراف الجريان تحت معدل التسرب المرتفع [3]	16
24	الشكل (7-3) النفوذية تبعاً لشروط التسرب المنخفضة والكثيفة [3]	17
25	الشكل (8-3) الحسابات اليدوية للإجهادات في الموقع [3]	18
26	الشكل (9-3) مخطط الإجهادات الفعالة باستخدام (PHASE2 v.6) [3]	19
27	الشكل (10-3) مثال عن مقطع عرضي لمنحدر متعدد الطبقات (from National Research Report 1990) [3]	20
27	الشكل (11-3) نموذج المنحدر باستخدام العناصر المحدودة لمقطع متعدد الطبقات [3]	21
32	الشكل (1-4) مسألة مدروسة تم تقسيمها إلى مجموعة من العناصر المحدودة	22
33	الشكل (2-4) مثلث الانفعال الثابت	23
34	الشكل (3-4) مثلث الانفعال الخطي	24
34	الشكل (4-4) عنصر خطي رباعي الأضلاع	25
35	الشكل (5-4) عنصر خطي رباعي الأضلاع تربيعي	26
39	الشكل (6-4) الاستجابة غير الخطية للنايبيض تبعاً للحمولة المطبقة و بدرجة حرية واحدة، و الإجراء المعتمد باستخدام طريقة العناصر المحدودة لتحديد سلوك النايبيض تحت	27

		تأثير الحمولة المطبقة
41	الشكل (1-5) خيارات مربع الحوار Project Settings	28
42	الشكل (2-5) يبين تفعيل خيار SSR للنموذج المدروس	29
43	الشكل (3-5) خيار إسناد شبكة العناصر المحدودة	30
43	الشكل (4-5) شبكة العناصر المحدودة للمنحدر المدروس والشروط الحدية الافتراضية	31
44	الشكل (5-5) شروط الاستناد الحرة عند سطح الأرض للمنحدر المدروس	32
44	الشكل (6-5) الإجهادات الحقلية	33
45	الشكل (9-5) الانتقالات الكلية للمنحدر المدروس	34
46	الشكل (10-5) مخطط عامل تخفيض مقاومة القص الحرج والانتقالات العظمى	35
46	الشكل (11-5) الأبعاد الهندسية للمنحدر المدروس	36
47	الشكل (12-5) الخواص الميكانيكية للمنحدر المدروس	37
48	الشكل (13-5) المنحدر قبل التحليل	38
48	الشكل (14-5) المنحدر وشعاع التشوهات وشبكة العناصر المحدودة المشوهة بعد الانتهاء من عملية التحليل باستخدام SSR	39
49	الشكل (15-5) قيم تخفيض التماسك أثناء التحليل باستخدام SSR	40
49	الشكل (16-5) المنحدر المدروس بعد القيام بعملية التحليل باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR	41
50	الشكل (16-5) قيم زاوية الاحتكاك أثناء وبعد استخدام طريقة SSR	42
50	الشكل (17-5) عامل تخفيض مقاومة القص الحرج والانتقالات الأعظمية الكلية	43
51	الشكل (18-5) خيارات مربع الحوار Project Settings	44
52	الشكل (19-5) المنحدر بعد إضافة إحدائياته	45
53	الشكل (20-5) خيار سطح الانزلاق الدائري	46
53	الشكل (21-5) خيارات تباعد الشبكة	47
53	الشكل (22-5) شبكة مراكز الانزلاق باستخدام خيار Auto Grid	48
54	الشكل (23-5) فلتره سطوح الانزلاق الصحيحة من قبل حدود النموذج	49
55	الشكل (24-5) طريقة توليد دوائر الانزلاق بالبحث الشبكي باستخدام حدود المنحدر وتزايد نصف القطر	50
55	الشكل (25-5) خواص مواد المنحدر المدروس	51
56	الشكل (26-5) طرق التوازن الحدي باستخدام برنامج Slide	52
57	الشكل (27-5) المنحدر بعد التحليل باستخدام طريقة Bishop	53
58	الشكل (28-5) المنحدر المدروس باستخدام طريقة Bishop	54

59	الشكل (29-5) المنحدر المدروس وعامل الأمان باستخدام طريقة Bishop المبسطة	55
60	الشكل (30-5) تغيير ميل المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة	56
61	الشكل (31-5) تغيير زاوية المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة	57
61	الشكل (32-5) قيم تغيير قيمة تماسك تربة المنحدر بتغيير النسبة H/L	58
62	الشكل (33-5) قيم تغيير قيمة زاوية احتكاك تربة المنحدر بتغيير النسبة H/L	59
63	الشكل (34-5) تغيير النسبة H/L وعامل الأمان باستخدام طريقة Bishop	60
65	الشكل (35-5) الفرق بين طريقتي Bishop و SSR في حساب عامل الأمان عند تغيير النسبة H/L	61
65	الشكل (36-5) تغيير تماسك تربة المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة لها	62
66	الشكل (37-5) تغيير قيم تماسك تربة المنحدر المدروس وقيم عامل الأمان باستخدام طريقة Bishop	63
67	الشكل (38-5) قيم عامل الأمان باستخدام طريقتي Bishop و SSR عند تغيير قيم تماسك تربة المنحدر	64
67	الشكل (39-5) يبين تغيير قيم زاوية الاحتكاك وعامل الأمان الموافقة	65
68	الشكل (40-5) تغيير قيم زاوية الاحتكاك للمنحدر وعامل الأمان الموافق باستخدام طريقة Bishop	66
69	الشكل (41-5) قيم عامل الأمان باستخدام طريقتي Bishop و SSR عند تغيير قيم زاوية احتكاك تربة المنحدر	67
69	الشكل (42-5) تغيير قيم كثافة المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة	68
70	الشكل (43-5) تغيير قيمة عامل بواسون وقيم عامل الأمان	69
70	الشكل (44-5) عامل المرونة للمنحدر المدروس وقيم عامل الأمان	70
72	الشكل (1-6) العوامل المؤثرة على الخلطة البيتونية	71
73	الشكل (2-6) القيم المتغيرة لكل من عامل المرونة عامل بواسون وقيمة عامل الأمان الموافقة	72
74	الشكل (3-6) قيم كثافة التربة المتغيرة وقيم عامل الأمان الموافقة	73
75	الشكل (4-6) القيم المتغيرة من تماسك وزاوية الاحتكاك لتربة المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة	74
75	الشكل (5-6) جميع العوامل المتغيرة وقيم عامل الأمان الموافقة	75
77	الشكل (6-6) متوسطات تأثير كل عامل	76
78	الشكل (7-6) التداخل بين العاملين $\phi, \gamma$	77
78	الشكل (8-6) مخططات التداخل	78

80	الشكل (9-6) الفرق بين القيم المحسوبة باستخدام المعادلة وباستخدام برنامج Phase	79
83	الشكل (10-6) متوسطات تأثير كل عامل	80
85	الشكل (11-6) تداخل العاملين $\phi c$	81
85	الشكل (12-6) تداخل العاملين $\phi \gamma$	82
85	الشكل (13-6) تداخل العاملين $\phi \beta$	83
85	الشكل (14-6) تداخل العاملين $c \gamma$	84
85	الشكل (15-6) تداخل العاملين $c \beta$	85
85	الشكل (16-6) تداخل العاملين $\gamma \beta$	86
86	الشكل (17-6) الفرق بين القيم المحسوبة باستخدام المعادلة وباستخدام برنامج Phase	87
94	الشكل (1-A) المجال التجريبي	88
95	الشكل (2-A) المستويات العظمى والصغرى للعوامل المدروسة	89
96	الشكل (3-A) مجال الدراسة لعاملين	90
96	الشكل (4-A) مجال الدراسة مع وجود قيود على بعض العوامل	91
98	الشكل (5-A) النقاط التجريبية	93
99	الشكل (6-A) العوامل المسيطر عليها وغير مسيطر عليها	94
101	الشكل (7-A) مجال الدراسة	95
101	الشكل (8-A) مجموعات مستويات عوامل التصميم	96
102	الشكل (9-A) مصفوفة التصميم المشفرة الكاملة	97
104	الشكل (10-A) مخطط التأثيرات الوسطية للعوامل المدروسة	98
104	الشكل (11-A) حالات التداخل بين العوامل	99
106	الشكل (12-A) مخططات التداخل بين العاملين	100

## الفصل الأول

### مقدمة عامة

#### 1-1 مقدمة:

هناك العديد من المشاكل الهندسية التي يتعرض لها المهندس الدارس أو المنفذ، لذلك فإنه من المفروض أن يكون مستعداً لوضع أسس تفيد في التنبؤ بحدوث مثل هذه المشاكل ووضع الحلول الملائمة في حال حدوثها ومن إحدى الحالات الشائعة والمطلوب دراستها: توازن واستقرار المنشآت الترابية وبعض المنشآت الخاصة كالمباني والجدران الأثرية وغيرها، من الناحية العملية فإن كل ظاهرة في الطبيعة، سواء كانت حيوية أو جيولوجية أو ميكانيكية يمكن أن يتم وصفها بمساعدة القوانين الفيزيائية عن طريق شروط التفاضل الجبري أو المعادلات التكاملية، لذلك فإن استخدام النماذج الرياضية لدراسة سلوك المنشآت الجيوتكنيكية هو جزء هام من التحليل الهندسي، ومن هنا تتبع أهمية فهم كيفية التعامل مع برامج النمذجة.

#### 2-1 أهمية البحث:

خلال فترة الستينات اعتمد علم ميكانيك التربة على النظرية والمعلومات التجريبية المحدودة، وقد كانت نمذجة الترب ذات المواصفات غير المتجانسة والمتغيرة بتغير الشروط المحيطة صعبة جداً. حيث أن التقنيات التجريبية قد تضمنت إلى حد ما الاختبارات البسيطة ولم تكن الأدوات الحاسوبية متوفرة آنذاك، لكن نظراً للتطور العلمي السريع الذي شهده العالم والذي أحدثته ثورة المعلومات، فقد أصبح من السهولة بمكان استخدام البرمجة في صناعة البرامج التي تعتمد على الطرق العددية والتي ساهمت في حل كثير من مسائل الجيوتكنيك.

#### 3-1 الغاية من البحث :

إن استخدام الحواسيب في الهندسة بشكل واسع ما هو إلا نتيجة للتقدم الذي حصل في إنتاج البرمجيات السهلة الاستخدام وانتشار الحواسيب الشخصية في العالم. حتى أنه يمكن القول بأن تصميم المنشآت (ذات المستوى العالي) بدون استخدام الحاسوب أصبح أمراً نادراً جداً. ويعتمد تصميم المنشآت المعقدة في وقتنا هذا على استخدام الحاسوب والبرمجيات الحديثة في إكمال التصميم بشكله الأمثل.

ويأتي هذا البحث ليركز على النظرية والتطبيق والذي نأمل من خلاله أن يساعد في تضيق الفجوة بين النظرية والتطبيق عن طريق المساهمة في استخدام واختيار أفضل برامج النمذجة التي يستخدمها المهندسين الجيوتكنيكيين عالمياً وبالتالي تمكين زملاء المهندسين من استخدام هذه البرامج وكيفية التعامل مع النتائج التي يمكن الحصول عليها من هذه البرمجيات.

كما أن مشكلة توازن المنحدرات في الوقت الحاضر تعتبر من المسائل الرئيسية التي تواجه العاملين في مجال ميكانيك التربة وحتى وقتنا الحاضر ما زال هناك خلاف كبير بين الباحثين عن الطريقة الأفضل لحساب استقرار المنحدرات .

لذلك فإن طريقة تخفيض مقاومة القص Shear Strength Reduction SSR المستخدمة في تحليل استقرار المنحدرات تأتي لتقدم نتائج جيدة لنطاق واسع من مشاكل استقرار المنحدرات وهي طريقة تضاهي



طرق التوازن الحدي من حيث قدرتها على نمذجة المقاومة غير الخطية كما أنها طريقة تتكيف مع الأنواع المختلفة لمواد ومساند المنحدر.

فمن خلال تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة SSR يمكن وبشكل مرئي تحديد آلية وشكل الانهيار بطرق كانت غير واضحة عند استخدام طرق التوازن الحدي ، إذ أن طريقة SSR المستخدمة في تحليل استقرار المنحدرات وجدت للعمل في الحالات التي يكون فيها تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طرق التوازن الحدي تعطي نتائج مضللة أو غير جيدة.

فمن خلال استخدام تقنية تخفيض مقاومة القص باستخدام طريقة العناصر المحدودة و التي تتوافق و بشكل كبير مع عامل الأمان المطلوب حسابه للمنحدر المدروس تم دراسة المنحدر من ناحيتين تصميمية و ميكانيكية و من ثم مقارنة النتائج التي حصلنا عليها نتيجة استخدام طريقة SSR مع واحدة من أكثر طرق التوازن المحدودة انتشاراً و استخداماً من قبل المهندسين و هي طريقة Bishop المبسطة، ثم تم تحديد العوامل المؤثرة على عامل الأمان و ذلك باستخدام واحدة من أكثر الطرق الإحصائية انتشاراً و هي طريقة التصميم التجريبي باستخدام المخططات العاملة و التي من خلالها تم تحديد تأثير كل عامل من عوامل التصميم على عامل الأمان و تحديد التداخل بين عوامل التصميم عن طريق تغير مستويات الدراسة للعوامل المدروسة لنحصل على نموذج رياضي يتم من خلاله حساب عامل الأمان عندما تتغير واحدة أو أكثر من عوامل التصميم المدروسة.

## 4-1 خطوات البحث:

يتضمن هذا البحث سبعة فصول، الفصل الأول عبارة عن مقدمة عامة و خطوات البحث، يتضمن الفصل الثاني عرض لبعض طرق استقرار المنحدرات المستخدمة من قبل شريحة واسعة من المهندسين الجيوتكنيكيين و التي تعتمد أغلبها على سطح انزلاق مفترض، بينما يتضمن الفصل الثالث مفهوم النمذجة العددية بشكل عام و مدى أهمية النموذج العددي و كيفية الوصول إلى نموذج عددي يحقق الهدف المراد من إنشائه في مجال الهندسة الجيوتكنيكية بشكل خاص و ذلك من خلال إلقاء الضوء على مثلث Burland الذي وضح أهمية النمذجة باعتبارها مكون أساسي من مكونات المثلث .

يتضمن الفصل الرابع طريقة العناصر المحدودة و تقنية تخفيض مقاومة القص و فيه يتم تقديم شرح حول النظرية الأساسية لحل المسائل المستوية، و أنواع العناصر المحدودة و طريقة العناصر المحدودة و استخدامها في تحليل استقرار المنحدرات من خلال تخفيض عناصر مقاومة القص من تماسك و احتكاك و مفهوم التقارب و معيار التوقف فمن خلال استخدام طريقة العناصر المحدودة في دراسة استقرار المنحدر و كيفية ملائمة مفهوم عدم التقارب مع مفهوم عامل الأمان بحيث أن انهيار المنحدر يحصل فقط عندما تزداد الانتقالات في المنحدر إلى درجة لا يمكن خلالها حساب استقرار المنحدر .

يوضح الفصل الخامس كيفية استخدام برامج النمذجة مثل Phase2 في تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص، إذ يتضمن الفصل الجزء العملي من الرسالة و فيه يتم تحليل استقرار النموذج المدروس لمنحدر متجانس يتم تغيير كل من متحولاته الهندسية و الميكانيكية و من ثم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع طريقة Bishop و ذلك باستخدام برنامج Slide5 و الذي يعتمد على نفس المبادئ المستخدمة في طريقة Bishop من حيث تحديد سطح الانزلاق ذو أصغر قيمة لعامل الأمان.

يتضمن الفصل السادس تقييم النتائج باستخدام طريقة المخططات التجريبية العاملة فمن خلال هذه الطريقة تم الوصول إلى نموذج رياضي تتغير فيه قيم عوامل التصميم و المؤثرة على عامل أمان المنحدر المدروس و من خلال هذه الطريقة يتم تحديد تأثير كل عامل من عوامل التصميم على مدى و مدى التداخل بين العوامل المدروسة.

يتضمن الفصل السابع نتائج البحث و اقتراحات و توصيات لامتداد هذا البحث من قبل الباحثين في المستقبل، بينما يتضمن الملحق A عرضاً للأسس النظرية لطريقة التصميم التجريبي و مفهوم الوحدات الهندسية و التي من خلالها يتم تقييم المتغيرات مما يسمح بالمقارنة المباشرة لتأثير العوامل فيما بينها.

## الفصل الثاني

### عرض لبعض طرق استقرار المنحدرات

### Slope Stability Methods

#### 1-2 مقدمة

إن تحليل استقرار المنحدرات يعتبر واحداً من أقدم مواضيع الهندسة الجيوتكنيكية، فبينما نحن ندخل القرن (21) يبقى أحد أكثر المواضيع الفعالة في الهندسة الجيوتكنيكية من حيث البحث والتطبيق، فتحليل الاستقرار مطلوب لأنواع مختلفة من المشاريع مثل: المناجم (open pit mines) حفريات وأعمال الطرق (road cuts)، السدود (dams)، الحواجز (embankments)، أوتاد الربط (tailings piles)، استقرار المنحدرات الطبيعية (natural slope stabilization) [2].

توجد عدة أساليب لدراسة استقرار المنحدرات نذكر منها [2]:

Stereonet analysis	التحليل الشبكي المجسم
Rock fall simulation	نمذجة انهيار الصخور
Limit equilibrium methods	طرق التوازن الحدي
Numerical methods	الطرق العددية

وتعتبر طرق التوازن الحدي من أقدم الطرق التي بحثت في مواضيع الاستقرار لذا كان لابد من التطرق إليها.

#### 2-2 أساسيات تحليل استقرار المنحدرات:

إن التحليل التقليدي لاستقرار المنحدرات يكون عبارة عن تحري عن توازن كتلة التربة المحدودة من أسفلها بسطح الانزلاق المحتمل ومن أعلاها بسطح المنحدر ومقارنة القوى والعزوم المسببة لحركة هذه الكتلة مع تلك التي تقاوم حالة عدم الاستقرار، معظم طرق التوازن الحدي تعتمد في تحليلها على المقطع العرضي (2-D) وفي حال الانفعال المستوي [1].

إن استقرار أو عدم استقرار الكتلة يعتمد على وزنها وعلى القوى الخارجية المؤثرة عليها مثل: (التسارع أو الزيادة في تلك القوى والناجئة عن الحمولات الديناميكية)، وعلى قوى القص وضغط ماء المسام على سطح الانزلاق، وكذلك الأمر بالنسبة لردود الأفعال الداخلية التي تطبق على سطح الانزلاق المفترض، وهذا ما يقودنا إلى تعريف عامل الأمان Factor Of Safety FOS: وهو نسبة مقاومة القص الفعلية (S) إلى مقاومة القص المطلوبة للتوازن ( $\tau$ ) [1].

$$F = \frac{\text{مقاومة القص الفعلية}}{\text{إجهاد القص التوازني}} = \frac{S}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi'}{\tau} \quad (1-2)$$

إذا تم تعريف قوى القص في شروط الإجهادات الفعالة فإن عامل الأمان يتم تعريفه كما يلي:

$$F = \frac{c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi'}{\tau} \quad (2-2)$$

حيث:  $C'$ : تماسك التربة في حالة الإجهادات الفعالة.

- $\phi'$ : زاوية الاحتكاك الداخلي في حالة الإجهادات الفعالة.  
 $\sigma$ : الإجهاد الناظمي الكلي على مستوى الانهيار.  
 $U$ : ضغط ماء المسام.  
 $(\sigma - u)$ : الإجهاد الناظمي الفعال على مستوى الانهيار.

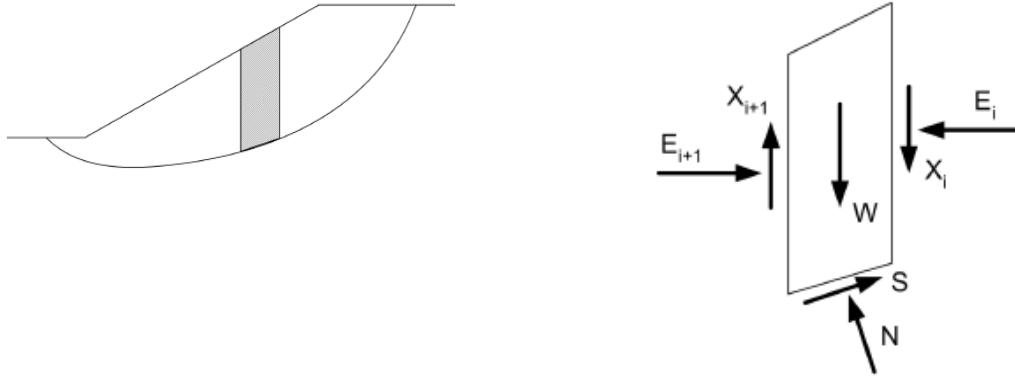
ومن خلال العلاقة السابقة يمكن القول أنه على طول سطح القص فإن إجهادات القص ترتبط مع مقاومة القص وعامل الأمان بالعلاقة التالية [1]:

$$\tau = \frac{c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi'}{F} \quad (3-2)$$

حيث يتم حساب عامل الأمان بفرض عدة قيم له، ثم حساب إجهادات القص الموافقة له من العلاقة السابقة إلى أن يحصل التوازن في العلاقة السابقة، في الواقع، فإن تأثير عامل الأمان FOS هو تخفيض مقاومة القص إلى أن يحصل التوازن فقط أو إلى أن يتم الوصول إلى شرط التوازن الحدي، إن معظم طرق التوازن الحدي والتي يشار إليها بأنها طرق التوازن الستاتيكي مثل:

#### OMS، Simplified Bishop، Modified Swedish Method، Spencer's Method

فهي تفترض تقسيم كتلة التربة المحصورة بين سطح الانزلاق المفترض و سطح المنحدر إلى مجموعة محددة من الشرائح الشاقولية، والقوى المؤثرة على كل شريحة بمفردها مبينة في الشكل (1-2):



الشكل (1-2) شريحة نموذجية والقوى المؤثرة عليها باستخدام طريقة الشرائح

- حيث:  $W$ : وزن الشريحة  
 $E$ : القوى الأفقية المؤثرة بشكل ناظمي على جوانب الشريحة  
 $X$ : قوى القص الشاقولية بين الشرائح  
 $N$ : القوة الناظمية المؤثرة على قاعدة الشريحة  
 $S$ : قوى القص المؤثرة على قاعدة الشريحة

كل القوى السابقة ما عدا وزن الشريحة تعتبر مجاهيل ويجب حسابها بطريقة توافق التوازن الستاتيكي وبملاحظة أن قيمة مقاومة القص المؤثرة على قاعدة الشريحة

يمكن حسابها بالاعتماد على جهودات القص من العلاقة:  $s = \tau \cdot \Delta l$  كما أن القوى الناظمية ترتبط مع الجهودات الناظمية بالعلاقة:  $N = \sigma \cdot \Delta l$  وبالتالي نحصل على:

$$s = \frac{c \cdot \Delta l}{F} + \frac{(N - u \cdot \Delta l) \cdot \tan \phi}{F} \quad (4-2)$$

حيث  $\Delta l$  طول قاعدة الشريحة، فالمعادلة السابقة (4-2) تربط مقاومة القص  $S$  بالقوة الناظمية المؤثرة على قاعدة الشريحة بعامل الأمان وقد تم اشتقاق المعادلة السابقة باستخدام معادلة مور- كولومب وبالاعتماد على تعريف عامل الأمان، وبالتالي نستطيع حصر المجاهيل بالجدول التالي كما نستطيع كتابة معادلات التوازن التي من خلالها نستطيع حساب القوى و المجاهيل الأخرى [1]:

عدد المجاهيل لـ n شريحة	المجاهيل
1	عامل الأمان F
n	القوة الناظمية المؤثرة على قاعدة الشريحة N
n-1	القوى الناظمية الأفقية المؤثرة على جوانب الشريحة E
n-1	قوى القص الداخلية بين الشرائح X
N	نقطة تأثير القوى الناظمية المؤثرة على قاعدة الشريحة
n-1	نقطة تأثير القوى الناظمية الداخلية
5n-2	العدد الكلي للمجاهيل
عدد المعادلات لـ n شريحة	المعادلات
N	معادلة توازن القوى في الاتجاه الأفقي $\sum fx = 0$
N	معادلة توازن القوى في الاتجاه الشاقولي $\sum fy = 0$
N	معادلة توازن العزوم
3n	العدد الكلي لمعادلات التوازن

الجدول (1-2) المجاهيل والمعادلات في طرق التوازن الحدي

في حال كانت ( $n > 1$ ) فإن عدد المجاهيل سيكون ( $5n-2$ ) والذي يفوق عدد المعادلات المتوفرة  $3n$  وهذا ما دفع المهندسين إلى وضع عدد من الافتراضات للوصول إلى حل للمنحدر المطلوب دراسة الاستقرار له، وبالتالي فإن كل طريقة من طرق التوازن الحدي تختلف عن الأخرى تبعاً لهذه الفرضيات.

### 3-2 طرق استقرار المنحدرات:

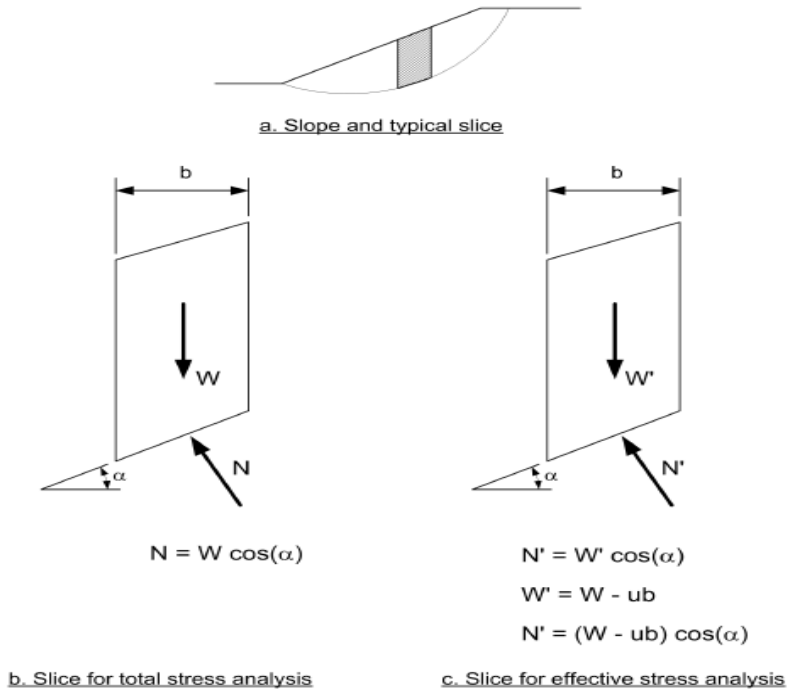
ومنها طرق التوازن الحدي وطرق التقريبات البسيطة:

## 1-3-2 أولاً: طرق التوازن الحدي Limit equilibrium methods :

### 1-1-3-2 طريقة الشرائح التقليدية The Ordinary Method of Slices OMS :

إن OMS و ما يعرف بطريقة (Fellenius;1936) تفترض أن القوى المؤثرة على جوانب الشريحة يتم إهمالها، كما هو مبين في الشكل (2-2) ويتم حساب القوة النازمية بدلالة وزن الشريحة وبالتالي باستخدام معادلة توازن العزوم للشرائح ككل حول مركز الدائرة يتم حساب المجهول الوحيد وهو عامل الأمان وذلك في حالة الإجهادات الفعالة من المعادلة (5-2):

$$F = \frac{\sum [c' \cdot \Delta l + (W \cos \alpha - u \cdot \Delta l \cos^2 \alpha) \cdot \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (5-2)$$



الشكل (2-2) شريحة نموذجية والقوى المؤثرة عليها باستخدام طريقة OMS

متحولات قوة القص لمركز قاعدة الشريحة	$c', \phi'$ حيث:
وزن الشريحة	$W$
ميل قاعدة الشريحة	$\alpha$
ضغط ماء المسام عند مركز قاعدة الشريحة	$U$
طول قاعدة الشريحة	$\Delta l$

إن طريقة OMS على الرغم من أنها تعتبر من أسهل الطرق التي تحسب عامل الأمان بشكل يدوي وسريع، وتفترض سطح انزلاق دائري، إلا أنها تغفل العديد من النقاط المهمة منها، [1]:

❖ إهمالها للقوى المؤثرة على جوانب الشريحة

❖ عدم تحقيقها لمعادلات توازن القوى الأفقية والشاقولية على الرغم من تحقيقها لمعادلة توازن العزوم لكثلة التربة ككل وليس لكل شريحة على حدى.

كما أن عامل الأمان المحسوب بطريقة OMS يختلف بمقدار (20%) عن القيم التي يمكن حسابها باستخدام طرق أدق مثل (Whitman and Bailey 1967) ومن المحتمل أن يزداد هذا الفرق أثناء تحليل الإجهادات الفعالة وبوجود ضغط ماء مسام كبير وهذا الخطأ سيعطي دوماً في طريقة OMS قيمة أصغر لعامل الأمان مما يعني أننا في الجانب الأيمن ولكنه يعتبر خطأ كبير في حال التصميم، وتجدر الإشارة إلى أن طريقة OMS تكون فعالة وتعطي قيمة لعامل الأمان قريبة جداً من تلك القيم التي تعطيها الطرق الصارمة والتي تحقق التوازن الستاتيكي وبشكل كبير عندما تكون  $\phi=0$ ، أي أن درجة حساسية طريقة OMS تعتمد على قيمة  $\phi$  سواء كان ضغط ماء المسام كبيراً أم صغيراً.

وتجدر الإشارة إلى أن طريقة OMS على الرغم من كل المآخذ السابقة إلا أنها لا تزال تعتبر طريقة مرجعية كأن تكون هناك حاجة لمراجعة التصميم من قبل آخرين ولأنها طريقة سهلة يمكن القيام بالحسابات يدوياً، حيث أن العديد من المنحدرات الحالية قد صممت بناءً على هذه الطريقة، [1].

### 2-1-3-2- طريقة Bishop المبسطة The Simplified Bishop Method:

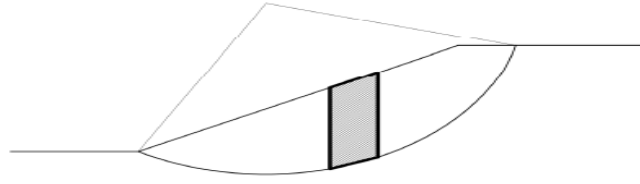
تم تطوير هذه الطريقة من قبل (Bishop;1955)، والذي اعتبر أن القوى الداخلية بين الشرائح هي قوى أفقية، كما هو مبين في الشكل (2-4)، كما يفترض أن سطح الانهيار دائري، وبالتالي يمكن حساب عامل الأمان من المعادلة التالية [1]:

$$F = \frac{\sum \left[ \frac{c' \cdot \Delta l + (W + P \cos \beta - u \cdot \Delta x \sec \alpha) \tan \phi'}{m_\alpha} \right]}{\sum W \sin \alpha - \frac{\sum M_p}{R}} \quad (6-2)$$

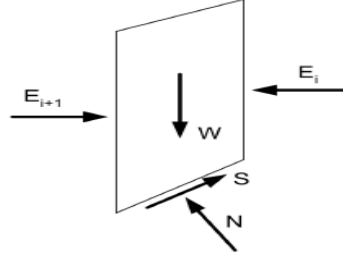
حيث أن  $\Delta x$  هو عرض الشريحة، و  $m_\alpha$  هي:

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \phi'}{F} \quad (7-2)$$

وبملاحظة أن عامل الأمان يوجد في طرفي المعادلة، فإن الحل سيتم باعتماد التقريب المتتالي لحساب عامل الأمان.



a. Slope and typical slip surface



b. Typical slice

الشكل (3-2) القوى المؤثرة على شريحة باستخدام طريقة Bishop

إن طريقة Bishop وعلى الرغم من استخدامها لمعادلة توازن القوى الشاقولية لكل شريحة، ومعادلة العزوم لكتلة التربة ككل، وذلك لحساب كل من  $F, N$ ، إلا أنها لا تحقق معادلة توازن القوى الأفقية، حيث أن أي قوة أفقية مطبقة ناتجة عن التحليل الزلزالي المفترض سيكون مشكوك بها، كما أنها طريقة محصورة فقط بتحليل سطح القص الدائري.

وعلى الرغم من المآخذ السابقة على هذه الطريقة إلا أنها تعطي قيم لعامل الأمان لا تختلف بمقدار (5%) عن طرق التوازن الستاتيكي وذلك بحسب:

(Fredlund and Krahn;1977;Whitman and Bailey;1967)، بالإضافة إلى ذلك فإن طريقة Bishop تعتبر سهلة نسبياً مقارنة مع الطرق الأكثر صرامة والحلول الحاسوبية، إذ يمكن تنفيذها بسرعة وحساباتها اليدوية لا تحتاج إلى وقت كبير وهي طريقة ذات سجل طويل من الخبرة، وهي طريقة مقبولة لحساب عوامل الأمان لسطوح الانهيار الدائرية، وينصح عند تصميم المنشآت الرئيسية باستخدام طريقة Bishop المبسطة أن يتم تدقيق التصميم النهائي باستخدام طريقة Spencer، كما يمكن تدقيق الحسابات إذا تم استخدام طريقة Bishop حاسوبياً يدوياً أو باستخدام مخططات استقرار المنحدر، أو باستخدام طريقة مع مراعاة الملاحظات حول قيم كل من  $\phi$  إذا كانت أكبر من الصفر والقيم الكبيرة لضغط ماء المسام.

### 3-1-3-2- طريقة توازن القوى والطريقة السويدية المعدلة

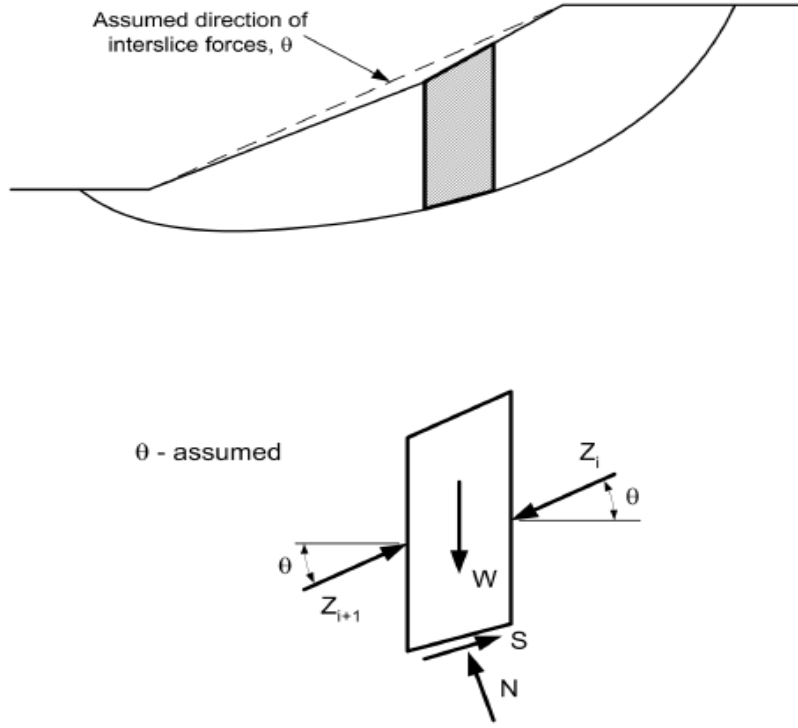
#### Force Equilibrium Method Including the Modified Swedish Method:

إن طرق توازن القوى كلها تعتمد على مبدأ فرض ميل القوى الجانبية بين الشرائح ( $\theta$ ) كما هو مبين في الشكل (4-2)، وهذه الطرق جميعها تحقق معادلتى التوازن في الاتجاهين الأفقي والشاقولي، ولكنها لا تحقق معادلة العزم، وبالتالي فإن عدد المجاهيل بالإضافة إلى عامل الأمان  $F$ ، والقوى الناظمية المؤثرة على قاعدة الشريحة  $N$  يكون لدينا مجهول إضافي وهو محصلة القوى الداخلية بين الشرائح  $Z$  أي أن (عدد المجاهيل  $= 2n$ )



كما أن (عدد المعادلات=2)، وفي حال كان سطح الانهيار المفترض دائرياً فإن طريقة توازن القوى تسمى بالطريقة السويدية المعدلة وهي تستخدم بشكل كبير في (Corps of Engineers) [1].  
 إن قيمة عامل الأمان في الطريقة السويدية المعدلة تختلف حسب الطريقة المستخدمة لتمثيل القوى الداخلية بين الشرائح ففي:

الطريقة الأولى : تعتبر القوى الداخلية بين الشرائح قوى كلية



الشكل (4-2) القوى المؤثرة على شريحة باستخدام الطريقة السويدية المعدلة

أما في الطريقة الثانية: فإنها تعتبر القوى الجانبية كقوى فعالة  
 إن النسخة الأصلية للطريقة السويدية المعدلة تعتبر القوى بين الشرائح كقوى فعالة [1]، على النقيض من ذلك فإن العديد من البرامج الحاسوبية تعتبر القوى بين الشرائح كقوى كلية وفيما يلي بعض الأسباب التي تجعل من اعتبار القوى كقوى كلية، وخصوصاً في البرامج الحاسوبية [1]:  
 1- في حال كانت الطبقات معقدة جداً فإنه من الصعب تعريف وحساب القوة المحصلة لضغوط ماء المسام على جوانب الشريحة.

2- خواص تصريف التربة تختلف من تربة لأخرى، فبعض التربة تصرف الماء بحرية وبالتالي نستطيع تمثيل قوى القص بالإجهادات الفعالة، أما في التربة ذات النفوذية الضعيفة فإننا نستخدم قوى القص غير المصرفة وبالتالي نستخدم تعبير الإجهادات الكلية.

3- في حال كانت الطريقة السويدية المعدلة تستخدم لإجراء التدقيق اليدوي على طريقة تحقق التوازن الستاتيكي الكامل والتي تستخدم القوى الكلية بين الشرائح مثل: طريقة (Spencer)، وبالتالي فإنه من المنطقي أن تكون القوى بين الشرائح كقوى كلية.

وبغض النظر عن القوى الداخلية بين الشرائح ما إذا كانت قوى فعالة أو قوى كلية، فإن ميل القوى يتم فرضه، وقد قدمت هيئة المهندسين (Corps of Engineers;1970) دليلاً على أن القوى الجانبية يجب أن تفترض على أنها موازية لـ "ميل المنحدر الوسطي" وهو عبارة عن: ميل الخط المستقيم الواصل بين قمة المنحدر وقدمه، إلا أن هذه الفرضية في بعض الأحيان تعطي قيم كبيرة لعامل الأمان وخصوصاً في حالة استخدام القوى الجانبية بين الشرائح كقوى كلية، لذلك فإنه من المنطقي اعتبار ميل القوى الجانبية بين الشرائح يساوي إلى نصف ميل المنحدر الوسطي عند استخدام القوى الكلية [1].

في عام (1973) قدّم Janbu تعديلاً على الطريقة السويدية المعدلة حيث اعتبر القوى الجانبية بين الشرائح عبارة عن قوى أفقية، وبذلك خفض قيمة عامل الأمان وبشكل ملحوظ ووفقاً لذلك أدخل ما يسمى بـ "عوامل التصحيح" لحساب القوى الأفقية بين الشرائح، وقد أطلق على هذه الطريقة اسم **طريقة Janbu المبسطة، "Simplified Janbu" Method**.

كما اقترح البعض مثل: "Lowe and Karafiath (1960)" بأن ميل القوى الجانبية المؤثرة على كل شريحة يختلف من شريحة لأخرى، ولحساب هذا الميل فإننا نعتبر أن الميل يساوي إلى ميل سطح الأرض (المنحدر) وسطح القص عند كل حد شاقولي لكل شريحة، ويبدو هذا الافتراض أفضل من الافتراضات السابقة وخاصة عند اعتبار القوى الجانبية كقوى فعالة، كما أن عامل الأمان المحسوب باستخدام هذه الفرضية يختلف حوالي (10%) عن القيمة المحسوبة باستخدام طرق مثل: (Duncan and Wright 1980)، والتي توافق التوازن الستاتيكي الكامل.

إن إيجاد عامل الأمان باستخدام الطريقة السويدية المعدلة يتم بحل معادلات توازن القوى إما تخطيطياً أو عددياً، وكلا الحلين يتطلبان التكرار واستخدام مبدأ التجريب، حيث يتم فرض عامل الأمان أولاً ثم يتم تحقيق توازن القوى، فإذا لم يتحقق التوازن يتم فرض عامل أمان جديد ويتم تكرار هذه العملية حتى يتم تحقيق التوازن للدرجة المقبولة:

1- الحل التخطيطي: ويتم عن طريق فرض عامل الأمان، ورسم مضع القوى كما هو مبين في الشكل (5-2) حيث يبين شريحة نموذجية لا تؤثر عليها أي من ضغوط ماء المسام مع ملاحظة ما يلي:

$$S = \frac{1}{F} (c\Delta l + N \cdot \tan(\phi)) \quad (8-2)$$

$$S = c_D \Delta l + N \cdot \tan(\phi_D)$$

حيث  $(c_D, \phi_D)$  متحولات قوة القص المطورة.

فأثناء رسم مضع القوى للشريحة الأخيرة والتي من المفترض عدم تأثير قوى جانبية عليها، لذلك يجب أن يغلق المضع على قيمة  $(F_D = N \cdot \tan(\phi_D))$  إلا أنه وبسبب أن الحل يقوم على فرض قيمة لعامل الأمان فلن يغلق المضع وسوف توجد قيمة للقوى الجانبية، وفي حالة كانت القوى المدروسة عن طريق الإجهادات الفعالة سيكون مضع القوى كما هو مبين في الشكل (5-2).

2- الحل العددي: في هذه الطريقة يتم حساب القوى الجانبية المؤثرة على كل شريحة باتجاه ميل المنحدر من معادلات التوازن فنحصل:

$$Z_{i+1} = Z_i + \frac{C_1 + C_2 + C_3 - C_4}{n_\alpha} \quad (9-2)$$

$$C_1 = W \left[ \sin \alpha - \frac{\tan \phi' \cdot \cos \alpha}{F} \right] \quad (10-2)$$

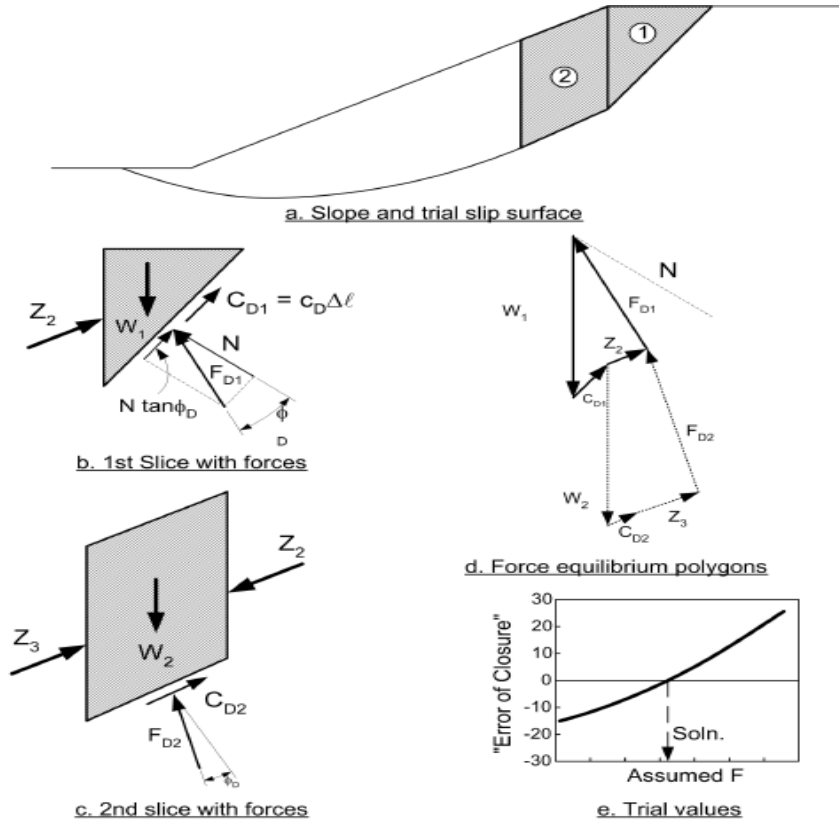
$$C_2 = (U_i - U_{i+1}) \left[ \cos \alpha + \frac{\tan \phi' \cdot \sin \alpha}{F} \right] \quad (11-2)$$

$$C_3 = P \left[ \sin(\alpha - \beta) - \frac{\tan \phi'}{F} * \cos(\alpha - \beta) \right] \quad (12-2)$$

$$C_4 = (C' - U \tan \phi') \cdot \frac{\Delta l}{F} \quad (13-2)$$

$$n_\alpha = \cos(\alpha - \theta) + \frac{\tan \phi' \cdot \sin(\alpha - \theta)}{F} \quad (14-2)$$

إن الزيادة أو النقصان في تقدير عامل الأمان المحسوب باستخدام الطريقة السويدية المعدلة مرتبطة بشكل رئيسي بالميل المفترض للقوى المؤثرة على جوانب الشريحة، مقارنة بالطرق التي توافق التوازن الستاتيكي بشكل كامل، هذه الحساسية لعامل الأمان تعود في قسمها الكبير لعدم تحقق معادلة توازن العزم في هذه الطريقة.



الشكل (5-2) مضع القوى المؤثرة على شريحة باستخدام الطريقة السويدية المعدلة

إلا أنها تعتبر الطريقة الوحيدة التي يمكن استخدامها لتحليل سطوح الانزلاق العامة وغير الدائرية، وهي طريقة سهلة لإجراء الحسابات اليدوية وخصوصاً عند تحليل سطح الانهيار غير الدائري، وتعطي نتائج مطابقة لتلك التي تعطيها طريقة Spencer عندما تكون  $(\theta)$  هي نفسها في كلا الطريقتين، وهي مفيدة لتحليل منحدرات تم تصميمها بطرق سابقة وطراً عليها ظروف جديدة مثل تغير ضغط ماء المسام أو أي تعديلات من الممكن أن تطرأ على المنحدر.

#### 2-3-1-4- طريقة Spencer's Method

يفترض Spencer (1967) أن كل القوى الجانبية بين الشرائح متوازية أي أنها تميل بنفس الزاوية ويتم حسابه كمجهول بالإضافة إلى  $Z, N$  والتي تؤثر في مركز الشريحة، وهي طريقة تحقق التوازن الستاتيكي الكامل مفترضة سطح انهيار دائري، إلا أن Wright 1969 أثبت أنه يمكن استخدام هذه الطريقة في تحليل سطوح الانزلاق غير الدائرية ففي هذه الطريقة يتم الحل على أساس أن نعرض قيمة كل من  $(F, \theta)$  إلى أن يتحقق التوازن لكل شريحة ومن ثم يتم إيجاد بقية القيم، [1].

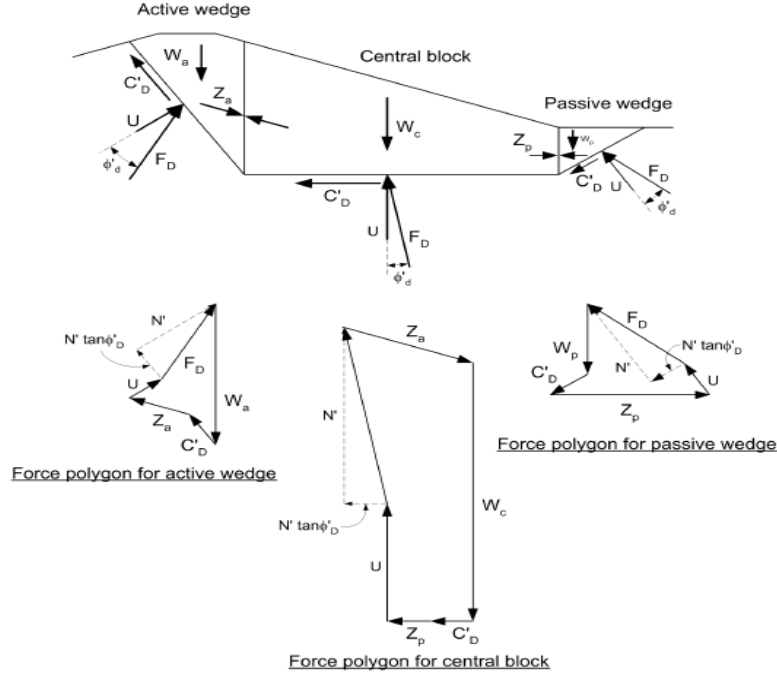
نتيجة للتطور الكبير للحواسيب فقد أصبحت طريقة Spencer عملية روتينية ومطبقة في العديد من البرامج الحاسوبية ومستخدمة من قبل عدة أجهزة حكومية [1]، وذلك بعدما كانت تعتبر طريقة غير عملية إذا تم استخدامها يدوياً فهي تستخدم لتدقيق التصميم النهائي لمنحدرات درست بطرق أبسط ويجب أن تحقق التوازن الستاتيكي الكامل.

إن تعقيد وطول الحسابات في طريقة Spencer يجعلها غير عملية للتدقيق اليدوي، ويتم تدقيقها باستخدام طرق توازن القوى حيث أننا سنحصل على نفس القيمة لعامل الأمان إذا تم استخدام نفس قيمة  $(\theta)$  في الطريقتين.

#### 2-3-1-5- طريقة The Wedge Method

تعتبر طريقة Wedge حالة خاصة من طريقة توازن القوى فهي تفترض كتلة الانزلاق مؤلفة من ثلاث مناطق: المنطقة الفعالة والمنطقة المركزية ومنطقة الدفع العكسي كما هو مبين في الشكل (2-7)، وأن ميل القوى على الحدود الشاقولية بين المناطق يتم فرضه كما في الطريقة السويدية المعدلة وفي أغلب الأحيان يعتبر هذا الميل مساوياً للصفر [1].

إن هذه الطريقة محدودة بتحليل المنحدرات الحرجة، كما أن عامل الأمان المحسوب يتأثر وبشكل كبير بميل القوى الجانبية المفترض، إلا أنها تعتبر طريقة مفيدة لتدقيق تحليل سطوح القص غير الدائرية باستخدام نفس قيمة  $(\theta)$  الناتجة عن طريقة Spencer أوفي حال تغير ضغوط ماء المسام أو حدوث أية تعديلات على ظروف المنحدر.



الشكل (6-2) مضع القوى المؤثرة على شريحة باستخدام طريقة Wedge

### 6-1-3-2- طريقة المنحدر اللامتناهي :The Infinite Slope Method

وهي طريقة سهلة وبسيطة تستخدم في المنحدرات ذات الترب غير المتماسكة، فهي تعتبر حالة خاصة من طريقة توازن القوى، إذ نفترض أن المنحدر عبارة عن شريحة واحدة

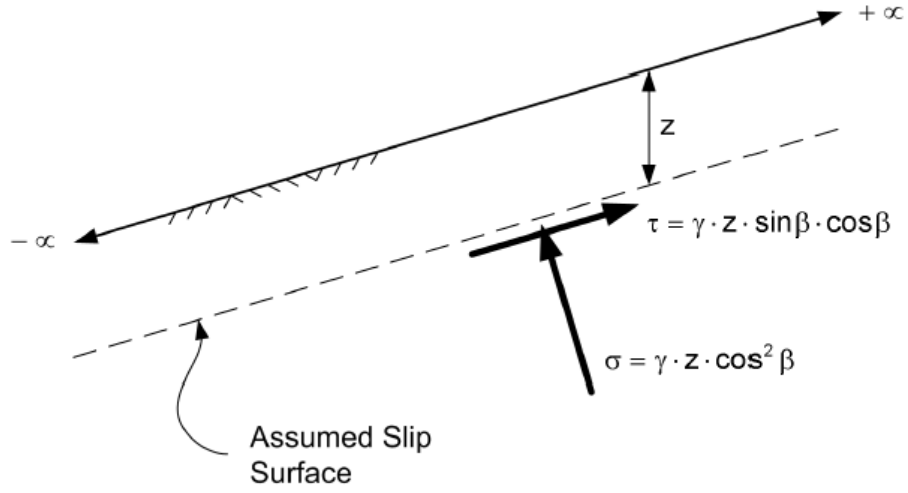
$$F = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} [1 - r_u \cdot (1 + \tan^2 \beta)] \quad (15-2)$$

$$r_u = \frac{u}{\gamma \cdot z} \quad (16-2)$$

وبالتالي فإن سطح الانهيار عبارة عن مستوي مواز لوجه المنحدر كما هو مبين في الشكل (8-2) ويتم حساب القوى الناعظية واجهادات القص على مستوي موازي لوجه المنحدر عند عمق ( $Z$ ) كما يلي:

حيث:  $\beta$ : ميل المنحدر.

وبالتالي يمكن اعتبارها طريقة مفيدة لتقييم استقرار المنحدرات الضحلة في الترب غير المتماسكة، مثل الترب السلتية غير اللدنة والرملية والترب الحصوية والحفريات الصخرية.



الشكل (7-2) منحدر لامتناهي

وبالتالي يمكن تلخيص طرق التوازن الحدي بالجدول التالي والذي يوضح دقة كل طريقة، وسطح الانزلاق المفترض من حيث شكله، وضعه بالنسبة لوجه المنحدر وآلية انهياره ومدى ملائمة الطريقة للتدقيق اليدوي:

Infinite Slope	Wedge	Modified Swedish	Spencer	Simplified Bishop	Ordinary Method of Slices	مميزات كل طريقة من حيث
X			X	X		الدقة
X						سطح الانزلاق موازي لوجه المنحدر
		X	X	X	X	سطح الانزلاق دائري
	X	X	X			آلية الانهيار بشكل Wedge
		X	X			سطح انزلاق غير دائري - أي شكل
X	X	X		X	X	مناسبة للحسابات اليدوية

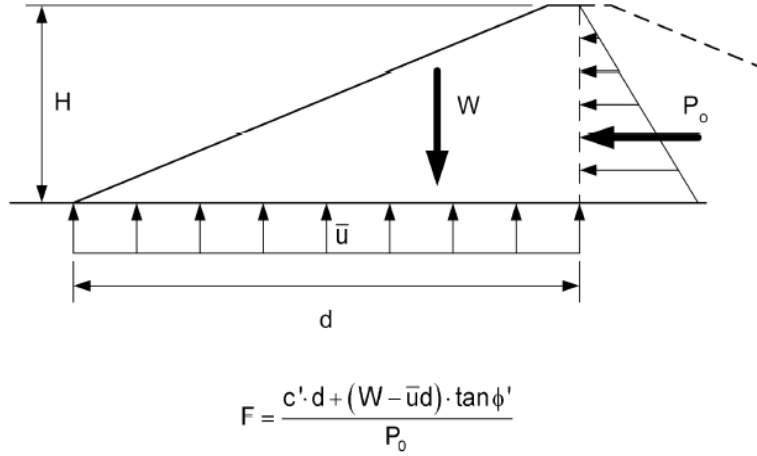
الجدول (2-2) مقارنة بين طرق التوازن الحدي

### 2-3-2-2- ثانياً: طرق التقريبات البسيطة Simple Approximations:

وهي مفيدة في التقدير المسبق لاستقرار الحفريات منها [1]:

#### 1-2-3-2- طريقة دفع التربة في حالة الراحة At-rest earth pressure method:

تستخدم هذه الطريقة لدراسة استقرار الحفريات، فهي تسمح بتقدير الانتشار الجانبي والانزلاق الأفقي للحفريات، وعامل الأمان يحسب عن طريق حساب دفع التربة على مستوي شاقولي في حالة الراحة إلى مقاومة القص على طول قاعدة الحفريات كما هو مبين في الشكل (8-2):



الشكل (8-2) طريقة دفع التربة في حالة الراحة

حيث  $P_0 =$  محصلة دفع التربة في حالة الراحة على الحفريات  
 $C', \phi =$  متحولات قوة القص على السطح الأفقي للحفريات والأساس

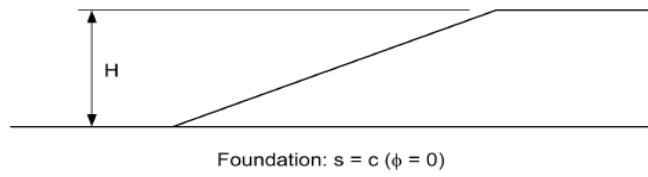
$\bar{U} =$  دفع ماء المسام على جملة الحفريات-الأساس

إن عامل الأمان المحسوب في هذه الطريقة يعتبر كافي لتخفيض التشوهات عند وجود مادتين أو أكثر تختلفان في الإجهادات والانفعالات، إذ يمكن تطبيقها في السدود الصخرية أو الحصوية والمزودة بنواة غضارية.

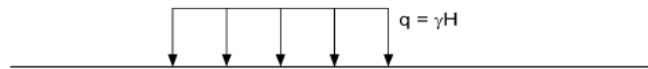
#### 2-2-3-2- طرق قدرة التحمل Bearing capacity methods:

تستخدم هذه الطرق لتحديد استقرار الحفريات غير المصرفة على الأساسات الغضارية المشبعة والمصرفة، عن طريق حساب قدرة تحمل هذه الأساسات ومقارنتها مع الإجهادات الشاقولية للحفريات، ويتم حساب قدرة التحمل على اعتبار أن الأساس شريطي موجود على سطح التربة، وذلك لغضار مشبع غير مصرف كما هو موضح في الشكل (9-2):

وهي طريقة محدودة بالأساسات المتجانسة، وتستخدم للتقييم قصير الأمد أثناء التحليل الأولي لتوازن الحفريات [1].



a. Actual embankment and foundation



$$F = \frac{q_{ult}}{q}$$

$$q_{ult} = N_c c = 5.14c$$

$$F = 5.14 \frac{c}{\gamma H}$$

b. Bearing capacity approximation

الشكل (9-2) طريقة قدرة التحمل



## الفصل الثالث

### النمذجة العددية

## Numerical Modeling

### 1.3 مقدمة

ظهرت النمذجة العددية Numerical Modeling، عندما انتقلت الطرق التحليلية من كونها أدوات بحث إلى أدوات تطبيق، ونتيجة للتطور السريع للبرمجيات الحاسوبية من جهة وسهولة استخدام هذه البرمجيات من جهة أخرى، فقد أصبح من الممكن استخدام تقنيات أكثر دقة مثل طرق التحليل بواسطة العناصر المحدودة Finite Element Analysis في التطبيقات الهندسية بثتى أشكالها [3].

تعتبر النمذجة العددية حديثة نسبياً في الهندسة الجيوتكنيكية، إذ يمكن تعريف النموذج العددي (Numerical Model): بأنه محاكاة رياضية لعملية فيزيائية حقيقية، في هذا الإطار قدم مجلس البحث القومي في تقريره 1990 تعريفاً للنموذج الرياضي بأنه [3]:

" نموذج تصوري عن فهمنا لعملية فيزيائية وترجمتها إلى مصطلحات رياضية، فالنموذج الرياضي هو نسخة طبق الأصل ومحاكاة لنظام حقيقي أو لجزء من هذا النظام "

"A mathematical model is a replica of some real-world object or system. It is an attempt to take our understanding of the process (conceptual model) and translate it into mathematical terms." National Research Council Report (1990), [3].

وبالتالي انطلاقاً من التعريف السابق نستطيع القول أن النمذجة العددية هي رياضية تماماً وبهذا المعنى فهي تختلف بشكل كبير عن النمذجة الفيزيائية المقيسة في المخبر، أو النمذجة الحقلية الكاملة المقيسة [3].

تمتاز النمذجة العددية عن النمذجة الفيزيائية بالعديد من الميزات، نذكر منها [3]:

- ❖ النموذج العددي يمكن عمله بشكل أسرع نسبياً من النموذج الفيزيائي الذي قد يأخذ شهوراً لبنائه بينما النموذج العددي يمكن أن يبني في دقائق أو ساعات أو أيام.
- ❖ النموذج الفيزيائي مقيد بمجموعة من الشروط بينما النموذج العددي يمكن استخدامه لتطبيق حالات واسعة ومختلفة.
- ❖ النمذجة العددية تزودنا بمعلومات ونتائج عند أي نقطة ضمن المقطع العرضي، النمذجة الفيزيائية تزودنا فقط بالاستجابات البصرية والبيانات الخارجية عند نقاط منفصلة.
- ❖ النماذج العددية يمكن أن تلبى مختلف الشروط الحدية، بينما النماذج الفيزيائية في أغلب الأحيان تكون محدودة بالشروط الحدية الممكنة.

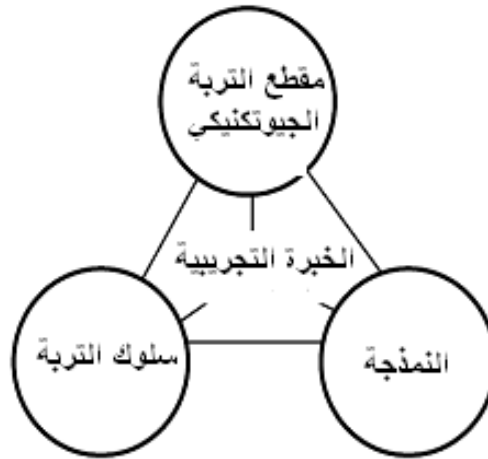
### 2-3 النمذجة في الهندسة الجيوتكنيكية:

إن دراسة استقرار المنحدرات هي إحدى تطبيقات الهندسة الجيوتكنيكية، حيث يتصدى لها المهندسين الجيوتكنيكيين ومهندسي الأنفاق، لذلك فإن تحليل الاستقرار مطلوب لأنواع مختلفة من المشاريع مثل: المناجم، مقاطع الطرق، السدود، الحواجز، الشدادات (Anchors)، المنحدرات الطبيعية [2].

وبما أن تحليل استقرار المنحدرات يمكن تقسيمه إلى طرق كلاسيكية تحليلية تعتمد على مبدأ التوازن الحدي Limit equilibrium methods وطرق أخرى تعتمد على النمذجة العددية Numerical Methods وبناءً على التطور السريع للحواسيب والبرمجيات على حد سواء فإن الطرق العددية مثل: طريقة العناصر المحدودة (finite element analysis)، وطريقة الفروقات المحدودة (finite difference analysis)، وطريقة العناصر المنفصلة (discrete element analysis)، هي من الطرق الأكثر تطبيقاً في مسائل استقرار المنحدرات [2].

إن دور النمذجة العددية وأهمية التحليل في الهندسة الجيوتكنيكية قد صورت بشكل واضح من قبل البروفسور (John Burland) من الكلية الملكية-لندن حيث قسم Burland الهندسة الجيوتكنيكية إلى ثلاث مكونات أساسية هي [3]:

مقطع التربة الجيوتكنيكي (ground profile)، سلوك التربة (soil behavior)، النمذجة (modeling)، ومثل هذه المكونات كقمة لرؤوس مثلث والذي أصبح يعرف فيما بعد باسم مثلث Burland (Burland triangle) كما هو مبين في الشكل (1-3)، يتضمن بند سلوك التربة (soil behavior): التجارب المخبرية، الاختبارات ضمن الموقع والقياسات الحقلية، أما مقطع التربة (profile ground) فهو يتضمن وبشكل رئيسي: وصف الموقع، تمثيل طبقات التربة فيه وتحديد الشروط المحيطة.

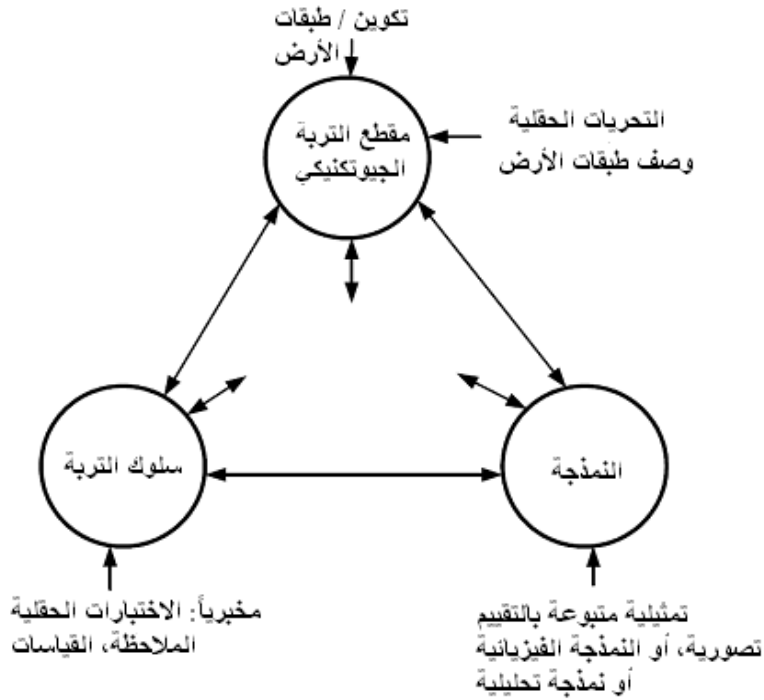


الشكل (1-3) مثلث Burland [3]

أما النمذجة modeling: من الممكن أن تكون تصورية conceptual، تحليلية analytical، أو فيزيائية physical فمن خلال وجهة نظر Burland فإن كل مكون من المكونات الثلاثة يرتبط مع الآخر بعلاقة بما يسمى الخبرة التجريبية وهذا ما يمثله الجزء داخل المثلث [3].

إن مثلث Burland يصور وبشكل واضح أهمية النمذجة في الهندسة الجيوتكنيكية لذلك فإن وصف شروط الحقل وعمل القياسات لسلوك التربة ليس كافياً ففي النهاية انه من الضروري عمل بعض التحليل العددي على المعلومات الحقلية لإكمال المثلث وذلك من خلال استخدام البرامج [3].

إن فكرة مثلث Burland كانت مثار جدل واسع بين المهندسين منذ أول مرة تم تقديمها، فقد تم تقديم بحث عن هذا الموضوع من قبل (Anon 1999) في مؤتمر المهندسين الجيوتكنيكيين (في ملبورن-استراليا 2000) حيث أدخل (Anon) بعض التعديلات والتحسينات على مثلث Burland كما هو مبين بالشكل (2-3) [3]:



الشكل (2-3) مثلث Burland المحسّن [3]

بملاحظة الشكل فإن أهم ميزة للإضافات إلى المثلث هي أن العلاقة قد أصبحت تبادلية بين المكونات الثلاثة، هذه الإضافة البسيطة تؤكد الحقيقة التالية: يتبين أن كل عنصر من عناصر المثلث متميز وله أهمية بالغة ومع ذلك هناك ترابط وثيق بين عناصر المثلث ، ولعل تنفيذ العملية بمراحلها مجتمعة تتطلب مجهود كبير من وقت وكلفة اقتصادية.

إن الفرضية الشائعة وهي: أن مكون النمذجة العددية هو مجهود صغير يمكن عمله بشكل بسيط وسريع هي فرضية خاطئة تماماً، فالنمذجة العددية الجيدة تتطلب وقتاً وتخطيطاً حذر بنفس الأسلوب الذي يأخذ وقتاً وتخطيطاً لجمع القياسات الحقلية ووصف شروط الموقع بشكل كافٍ [3].

### **3-3 الغاية من استخدام النموذج العددي Why To Model?**

لكل نموذج عددي عدة أسباب تستدعي القيام به يمكن حصرها بما يلي [3]:

1- الحصول على قيم ونتائج.

2- مقارنة النتائج.

3- تحديد العوامل الأساسية.

4- تفسير العمليات الفيزيائية.

### **1-3-3 الحصول على قيم ونتائج Quantitative Predictions:**

الغاية من النموذج العددي هي الحصول على توقعات معينة وسلوك ما لنموذج هندسي محدد، [3]، مثل توقع شكل التشوهات الحاصلة على أساسات المنشأة المعرضة لأحمال معروفة تستند على تربة معروفة الخواص، أو حساب عامل الأمان (باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR) لمنحدر ذو مواصفات هندسية وميكانيكية محددة، وبالتالي هناك غاية من النموذج العددي وهو معرفة شيء عن السلوك المستقبلي أو الأداء.

### **2-3-3 مقارنة النتائج Compare alternatives:**

إن النمذجة العددية فعالة في حال المقارنة بين النتائج في جميع الحالات للمسألة المدروسة، فبإجراء مقارنة بين الحلول وذلك عن طريق تغيير قيم أحد المعطيات وتثبيت المعطيات المتبقية يمكن الحكم على أهمية وتأثير كل بديل (متغير أو عامل) على حدى وبمعزل عن البدائل الأخرى على المسألة المدروسة [3]، مثل أن تحكم مدى تأثير التغيير في طول جدار بالقرب من منحدر ما وتأثيره على ضغط الرفع وهي عملية بسيطة جداً في النمذجة العددية [4].

### **3-3-3 تحديد العوامل الحاكمة Identify governing Parameters:**

النماذج العددية مفيدة في تحديد العوامل الحاكمة في التصميم، حيث يتم دراسة أثر كل عامل بمفرده ومن ثم يتم تحديد المتحولات الأساسية الحاكمة في نتائج المسألة المدروسة.

ويجب ملاحظة أن العوامل الثلاثة السابقة مرتبطة مع بعضها البعض، إذ أنه لا يمكن أن بناء نموذج دون أن يكون هناك حاجة للحصول على قيم كمية بعد إدخال البيانات إلى البرنامج وتحديد أي من هذه المدخلات تؤثر بشكل رئيسي على استقرار منحدر ما ذو مواصفات هندسية محددة، وفي النهاية نريد

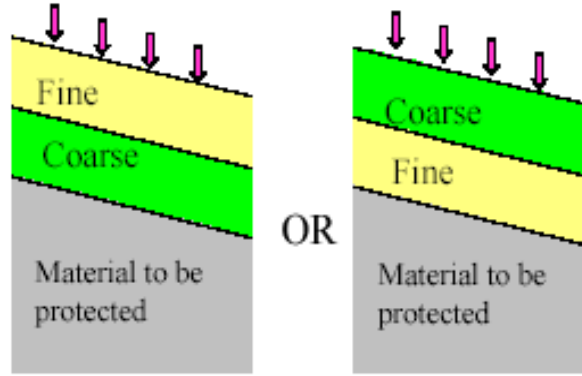
معرفة أياً من العوامل الأساسية والمتعلقة بالخواص الجيوتكنيكية للمنحدر من تماسك أو احتكاك أو كثافة لترربة المنحدر الذي يؤثر على تصميم المنحدر المدروس.

### 4-3-3 تفسير العمليات الفيزيائية:

#### Discover and understand physical process-train our thinking

إحدى أقوى سمات النمذجة العددية هي قدرتها على زيادة فهم العمليات الفيزيائية والتي تساعد في تدريب تفكيرنا، فالنموذج العددي يمكن أن يؤكد تصورنا أو أن يساعدنا لتعديل هذا التصور إذا كان ذلك ضرورياً [3].

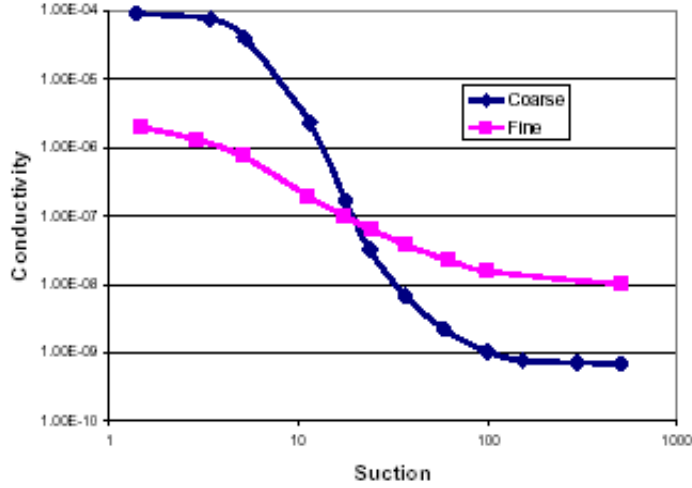
وكمثال على ذلك: لنفرض أنه لدينا طبقة ترابية ضمن منحدر يراد حفظها من جريان الماء ليتم تصريفه أسفل المنحدر، ولهذا الهدف سنقوم بتصميم غطاء ترابي يتكون من طبقتين: إحداهما طبقة من المواد الناعمة والثانية هي طبقة من المواد الخشنة كما هو مبين في الشكل (3-3) [3]:



الشكل (3-3) حالتين محتملتين لشكل الغطاء الترابي [3]

السؤال الذي يطرح نفسه هو: هل يجب أن تستند التربة الخشنة على التربة الناعمة، أو أن التربة الناعمة تغطي الخشنة؟ بشكل بديهي فإننا سنضع التربة الخشنة في الأعلى بسبب نفوذيتها العالية، إن نمذجة هذه الحالة عن طريق برنامج (PHASE2 v.6) والذي يعالج التدفق غير المشبع، يمكن أن يجيب عن هذا السؤال وأن يثبت تصورنا إذا كان صحيحاً.

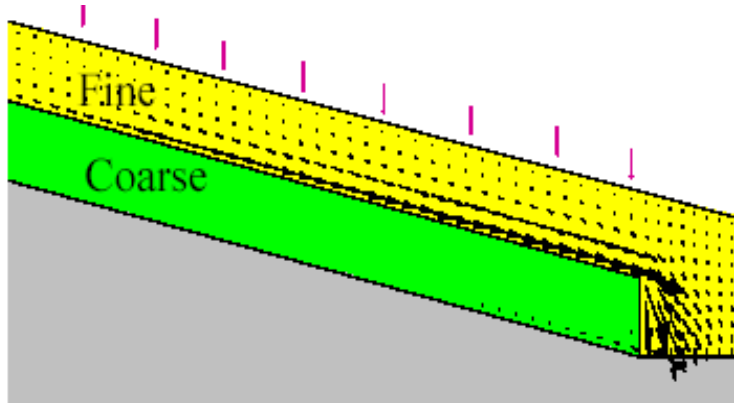
وبما أننا في حالة التدفق غير المشبع، فلا بد من أن نعرف (hydraulic conductivity function) الناقلية الهيدروليكية: وهو تابع يصف كيف أن النفوذية الهيدروليكية تتغير في حالة الامتصاص (ضغط ماء سلبي = امتصاص) وهذا ما يبينه الشكل (4-3):



الشكل (4-3) تابع النفوذية [3]

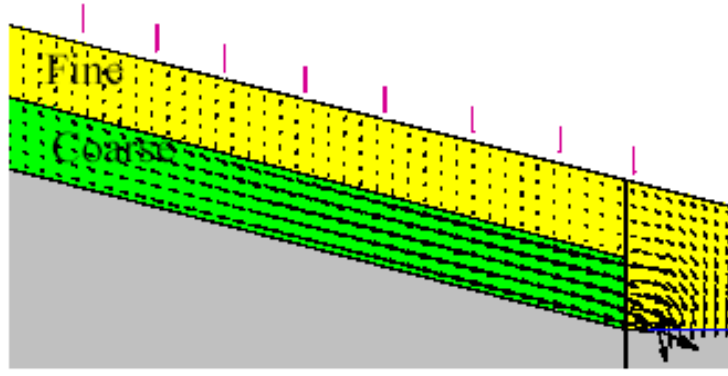
من الشكل نلاحظ أن: في مناطق الامتصاص الضعيفة (قريبة من الإشباع) فإن المواد الخشنة ذات نفوذية عالية مقارنة بالمواد الناعمة، وبالمقابل فإنه في مناطق الامتصاص العالي (ضغط ماء المسام السلبي كبير) ستكون المواد الناعمة ذات نفوذية عالية، وهذا السلوك يبدو غير متوقفاً في أغلب الأحيان. أي أن المواد الناعمة تزداد نفوذيتها كلما زاد ضغط ماء المسام السلبي (الامتصاص) [3].

ويعمل التجارب والتحليلات المختلفة وذلك بتغيير معدلات التسرب للغطاء سنلاحظ أن سلوك الغطاء تابع لمعدل التسرب (الشدة المطرية)، فعند معدلات التسرب المنخفضة فإن تأثير وضع المواد الناعمة فوق الخشنة سيحقق هدف الغطاء لأن تصريف التسرب سيتم بشكل جانبي ودون المرور بالطبقة الخشنة [3] كما هو مبين في الشكل (5-2):



الشكل (5-3) انحراف الجريان تحت معدل التسرب المنخفض [3]

ولكن في حال كان معدل التسرب (المطر) مركزاً جداً، ففي هذه الحالة فإن التسرب سيخترق طبقة المواد الناعمة ماراً بطبقة المواد الخشنة السفلية كما هو مبين في الشكل (6-3):

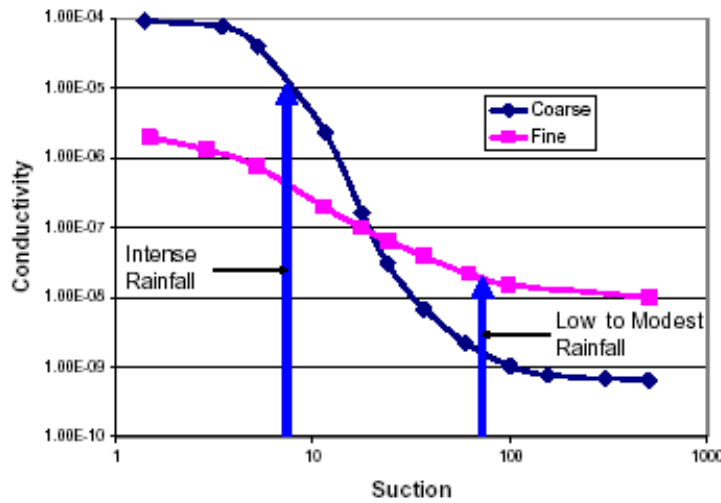


الشكل (6-3) انحراف الجريان تحت معدل التسرب المرتفع [3]

وبالتالي فإن التسرب لن يصل إلى طبقة المواد المراد حمايتها وبالتالي فإن تصميم الغطاء الترابي وذلك بأن تكون طبقة المواد الناعمة فوق الخشنة سيحقق الهدف المراد من الغطاء.

ولكن في المناطق القاحلة والتي يكون تسرب الماء بشكل من الممكن أن يصل فيه إلى طبقة المواد المراد حمايتها، هذه الحالة من الممكن أن تحصل ولكنها محدودة الزمن، ففي حالة أن معدل الأمطار معتدل فإن تسرب الماء سيتم تصريفه عن طريق طبقة المواد الناعمة العليا. وهو الحل الأفضل أيضاً في المناطق القاحلة لتصميم الغطاء الترابي وذلك بوضع طبقة المواد الناعمة أعلى المواد الخشنة، وهذا ما يناقض التوقع الأولي الذي تم وضعه لتصميم الغطاء، وقد كان رد الفعل الأولي على ذلك أن هناك خلافاً ما في البرنامج، لكن هناك احتمال آخر وهو أن الخطأ يمكن أن يكون في فهمنا للعملية وبالتالي فإن تفكيرنا العام خاطئ [3].

وبعمل فحص أدق لوظيفة التوصيل الهيدروليكي سنجد أن النتائج التي وصلنا إليها منطقية جداً وأن البرنامج لا يشكو من أي خلل وهو يعطينا الاستجابة الصحيحة تبعاً للمتحولات التي زودناه بها، من الشكل (7-3):



الشكل (7-3) النفوذية تبعاً لشروط التسرب المنخفضة والكثيفة [3]

نلاحظ أنه عندما يكون معدل التسرب كبيراً فإن ضغط ماء المسام السالب أو الامتصاص سيكون صغيراً وبالتالي فإن نفوذية المواد الخشنة ستكون أعلى من المواد الناعمة ، وبالمقابل في حالة كان معدل التسرب صغيراً فإن الامتصاص سيزيد، ونفوذية المواد الناعمة غير المشبعة ستكون أعلى من المواد الخشنة.

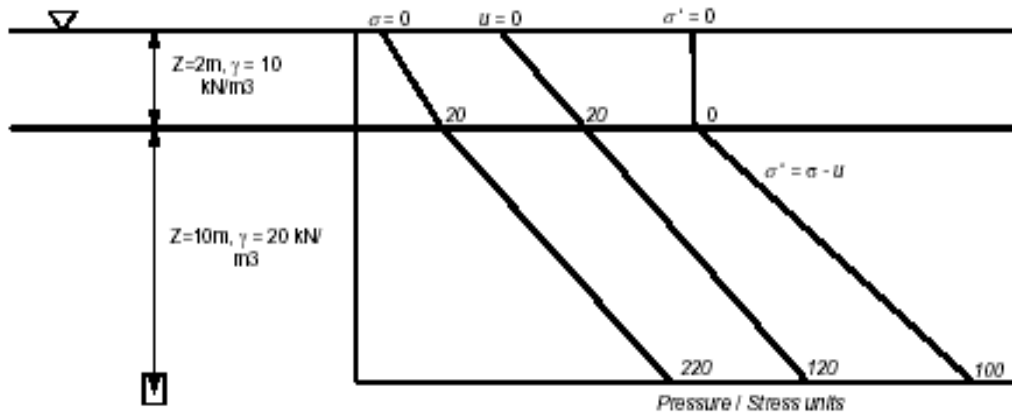
ولذلك، فإنه تحت معدلات التسرب المنخفضة فإنه من الأسهل للماء أن يتدفق من خلال الطبقة الناعمة العليا وبدون أن يمر من طبقة المواد الخشنة السفلية ذات النفوذية الضعيفة.

الفائدة الرئيسية للنمذجة وبشكل خاص أدوات النمذجة الحاسوبية هي قابليتها لتحسين أو تعديل قرار المهندس، فالنمذجة العددية هي أولاً وقبل كل شيء عملية (process) وليست حول التوقع فعملية النمذجة هي رحلة اكتشاف و طريقة لتعلم شيء جديد عن عالما الفيزيائي المعقد.

### **4-3 كيفية بناء النموذج How to model:**

#### **1-4-3 فرض تصور أو لي Make a guess:**

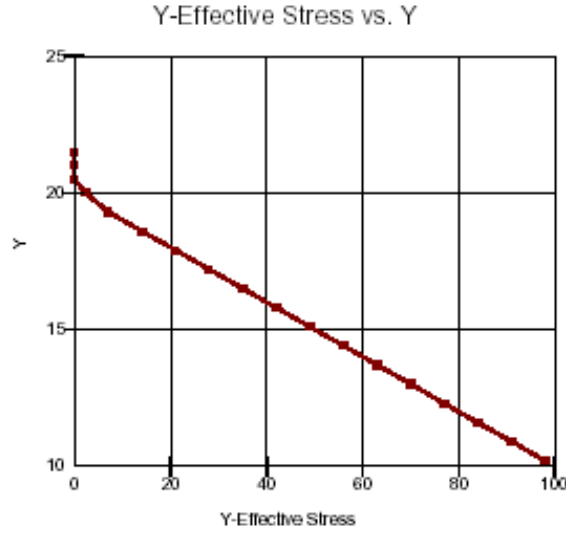
إن اعتماد منهج إدخال بعض البيانات إلى البرنامج لتمثيل منحدر ما وعمل التحليل العددي للمنحدر والحصول على نتائج ثم أن نقرر بعد ذلك ما العمل بالنتائج يعتبر منهجاً خاطئاً فالمنطق يقول بأنه يتم أو لا اقتراح تصور أو لي للنموذج بشكل يكون أقرب للحل المتوقع وذلك حسب خبرة المصمم، فالنمذجة الجيدة تبدأ ببعض التخطيط، يجب أن يتم تشكيل صورة عقلية للنتائج التي سنحصل عليها أو أن يكون لدينا تخمين أو لي عن الحل قبل البدء باستخدام البرنامج [3]. وكمثال على ذلك أيضاً إذا كانت لدينا حفرة مغمورة وأردنا حساب الإجهادات الكلية والفعالة و ضغط ماء المسام يدوياً سنحصل على النتائج المبينة في الشكل (8-3)، [3]:



الشكل (8-3) الحسابات اليدوية للإجهادات في الموقع [3]



وبمنذجة نفس الحفرية باستخدام برنامج (PHASE2 v.6) ورسم مخطط الإجهادات الفعالة الشكل(9-3):

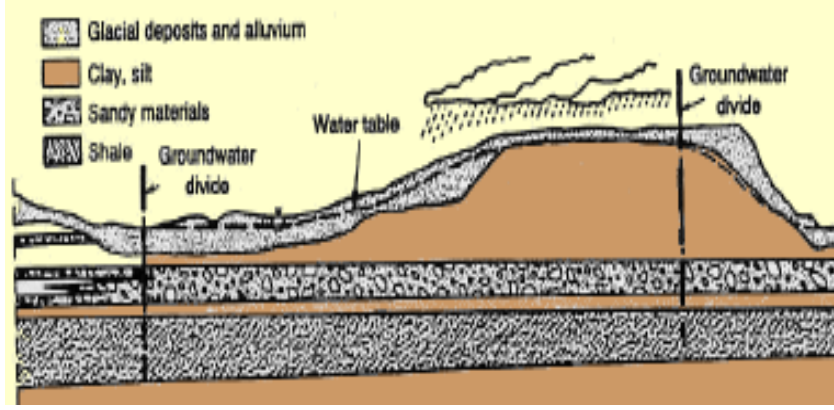


الشكل (9-3) مخطط الإجهادات الفعالة باستخدام (PHASE2 v.6) [3]

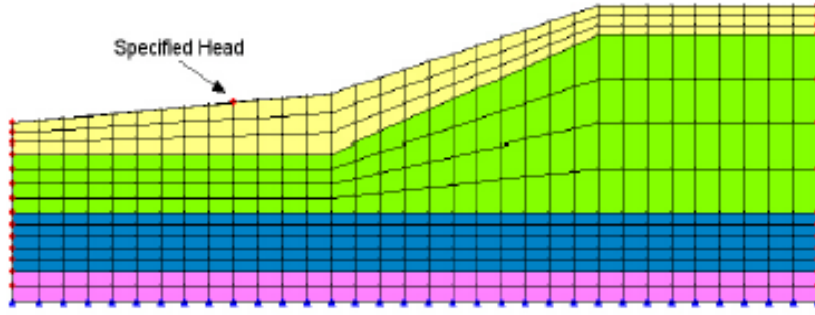
بمقارنة النتائج بين الحساب اليدوي والبرنامج سلاحظ أن النتائج غير منطقية بالنسبة للتصور الأولي أو انه هنالك خطأ ما تم في تعريف النموذج العددي، من الممكن أن شروط الضغط الحدية لم يتم تعريفها أثناء تعريف منسوب البساط المائي، لأن البساط المائي يتحكم بضغط ماء المسام للتربة ولكنه لا يضيف وزن الماء لسطح التربة في البرنامج لذلك يجب تضمين وزن الماء أثناء تعريف البساط المائي للنموذج[3]، إذا لم يكن لدينا أي تخمين أو لي عن الحل عندها سيكون من الصعب جداً الحكم على صلاحية نتائج النمذجة العددية.

### 2-4-3 تبسيط النموذج Simplify Geometry:

من الضروري أن تكون النماذج العددية عبارة عن تجريد مبسط لشروط الحقل الفعلية، ففي الحقل من الممكن أن يكون توضع الطبقات معقداً جداً والحدود غير واضحة، في النموذج العددي يجب أن تكون الحدود خطوط مستقيمة وأن تكون الطبقات مبسطة حتى يكون من المحتمل الحصول على حل مفهوم، عموماً، لا يجب للنموذج العددي أن يتضمن كل التفاصيل الموجودة في الحقل، فإذا تمت المحاولات لتضمين كل التفاصيل الدقيقة، فالنموذج سيصبح معقداً جداً، وسيكون صعباً وفي بعض الأحيان من المستحيل ترجمة أو حتى الحصول على نتائج[3]، وقد أعطى مجلس البحث القومي مقطعاً عرضياً لمنحدر ترابي متعدد الطبقات كما هو مبين في الشكل (3-10):



الشكل (3-10) مثال عن مقطع عرضي لمنحدر متعدد الطبقات (from National Research Report 1990) [3]  
 النموذج العددي الذي يحاكي نظام التدفق بين طبقات المنحدر المختلفة مبين في الشكل (3-11): حيث أن الطبقات قد تم تبسيطها وتم اعتبار أن الحدود مستمرة وذلك لتبسيط التحليل بالعناصر المحدودة [3].



الشكل (3-11) نموذج المنحدر باستخدام العناصر المحدودة لمقطع متعدد الطبقات [3]

**قاعدة عامة:** يجب أن يصمم النموذج ليحيط عن أسئلة محددة، فإذا كانت هذه الميزة التي ستضاف على النموذج ستؤثر على النتائج بشكل ملحوظ، أم لا، والسعي هنا دوماً نحو تبسيط النموذج إذا كان هنالك أدنى شك يجب عدم إضافتها للنموذج على الأقل في مراحل التحليل الأولية، ابدأ دوماً بالنموذج الأبسط، [3].

إن ميل صناع النماذج إلى عمل النموذج معقداً جداً منطلقين من فكرة أنه يجب تضمين كل شيء للحصول على أفضل النتائج المتوقعة في النمذجة العددية، ليس صحيحاً دوماً، لأن ازدياد التعقيدات لا تقود غالباً إلى نتائج دقيقة أو أفضل، فالتفاصيل الهندسية من الممكن أن تخلق صعوبات عديدة والتي من الممكن أن تخفي الحل الدقيق [3].

### 3-4-3 البداية بالأبسط Start Simple:

إنه أكثر فعالية أن يتم البدء بنموذج بسيط ثم تضاف الصعوبات على مراحل للنموذج، فالبداية الجيدة تكون باستخدام مقطع متجانس ثم يتم إضافة الصعوبات الهندسية على مراحل، فمن السهولة بمكان الحكم على صحة النتائج في المقطع المتجانس وهذا ما يسمح بالحصول على ثقة في الشروط الحدية وخواص

المواد المعرفة، فعندما يتم الوصول إلى نقطة تكون فيها النتائج مفهومة وذات معنى يمكن إضافة المواد المختلفة وزيادة تعقيد النموذج المدروس، فأتثناء دراسة المنحدر الغضاري والمزود بطبقة رقيقة ضعيفة ليس هناك من داعٍ لتغيير قيم عامل المرونة وعامل بواسون أو حتى كثافة التربة منذ بداية العمل بالنموذج لذلك يتم تثبيت كل القيم السابقة ومثلاً يمكن تغيير قيمة التماسك للطبقة الضعيفة ومن الممكن تغيير القيم المثبتة في مراحل متقدمة للنموذج [3].

### 4-4-3 التحقق العددي Do numerical experiment:

يتطلب تقييم نتائج النماذج العددية عمل عدة تجارب عديدة، للتأكد من منطقية النتائج، يفيد هذا المنهج في فهم وتعلم كيفية تشغيل بعض الميزات المعينة، الفكرة تبدأ بوضع مشكلة بسيطة يمكن إيجاد الحل لها بالحسابات اليدوية. فالتجارب العددية البسيطة لا تأخذ إلا دقائق لبدئها وتشغيلها ولكنها تعتبر في غاية الأهمية للتأكد من أن البرامج تعمل بشكل صحيح [3].

إجراء التجارب العددية البسيطة هو تدريب مفيد لكل من المنمذجين المبتدئين والخبراء، فبالنسبة للمبتدئ في النمذجة تعتبر طريقة فعالة لفهم المبادئ الأساسية، فهو يتعلم كيفية عمل البرامج ويكسب ثقة لترجمة النتائج، أما بالنسبة للخبراء في النمذجة فهي تعتبر وسيلة فعالة لتجديد وتأكيد الأفكار [3].

### 5-4-3 الاعتماد بداية على قيم تقديرية للخصائص:

#### Start with estimated material properties

إن اعتماد أغلب المهندسين على المقولة الشائعة: (لقد قستها في المخبر ولدي الثقة الكاملة بأرقامى)، ستؤدى إلى مشكلة، وهي تكمن عندما تكون البيانات المخبرية في متناول اليد والبيانات كلها سيتم استخدامها في النموذج فإن البيانات المخبرية ستبدو في هذه الحالة بأنها غير مرنة وستخلق صعوبات عند استخدامها ضمن النموذج العددي مما سيخلق فجوة حقيقية وكبيرة بين النتائج المخبرية التي تم تحديدها والسلوك الفعلي للتربة في الموقع، وعندها ستظهر بعض التقييدات المتعلقة بكيفية جمع المادة؟ كيف تم اختبارها وتقييمها في المخبر؟، هل تم جمع العينة بالمجرفة، ما هو حجم وعدد العينات التي تم جمعها والتي يمكن اعتبارها ممثلة لكامل المقطع، هل كانت العينة مجففة في الفرن، ومنخولة؟ هل تم استبعاد الأجزاء الكبيرة من العينة؟ بعض هذه التقنيات المخبرية المعروفة يمكن أن تعطي نتائج غير دقيقة عن عمل بعض الخواص، ويعتبر هذا التحليل تمرين جيد للنمذجة مما يحتويه على حلول منطقية وقيم واقعية [3].

من الممكن أن البيانات المخبرية التي تم جمعها هي أكثر مما نحتاجه للنموذج، وبسبب أننا قد استهلكنا أموالاً في جمع وقياس البيانات، فإن هذا ما يجعل المنمذجين حذرين تجاه تجربة مع تغيير البيانات لمعرفة تأثيرها على التحليل. أن نقرر بشكل مسبق ما هي خواص المواد التي تحكم التحليل وأنها من الملائم أن نجري عليه الاختبارات هذا ما يعتبر إجراء مكلف إلا أنه من ناحية أخرى هو أكثر فعالية.

### 3-4-6 فحص (تحليل) النتائج Interrogate the results:

البرامج العددية الفعالة مثل برنامج (PHASE2 v.6) تحتاج إلى خبرة من المستخدم، فمن السهل تعريف الشروط الحدية بشكل غير ملائم أو الخواص الخاطئة للمواد وبشكل غير متعمد، وبالتالي فإنه من المفيد وبشكل حيوي إجراء عمليات تدقيق عشوائية للتأكد من أن المساند وخواص المواد هي ثابتة ومتوافقة مع التعريف المقصود، وأن النتائج أصبحت مفهومة [3].

إن المعاينة والتدقيق العشوائي للنتائج يساعد على زيادة الثقة في الحلول المفهومة والمعروفة، فعلى سبيل المثال: هل الشروط الحدية التي تظهر في النتائج هي نفسها كما تم اعتقادها عندما بناء النموذج؟ هل الخواص المقصودة قد تم تطبيقها على التربة الصحيحة؟ هل كانت الشروط الأولية كما تم افتراضها؟ إن برنامج (PHASE2 v.6) يمتلك العديد من الأدوات لتدقيق النتائج، إذ يمكن الحصول على تفاصيل عقدة أو عنصر وسيكون هنالك بارامترات واسعة والتي خططت لهدف تدقيق النتائج [3].

### 3-4-7 تقييم النتائج ضمن سياق القيم المتوقعة

#### Evaluate results in the context of expected results

للوصول إلى الحل المثالي فإن عملية النمذجة العددية تحتاج أن تكرر كثيراً، مع تقييم مستمر لكل النتائج. السؤال الأساسي والذي يجب طرحه خلال النمذجة: (هل توافق النتائج التصور العقلي الأولي؟)، إذا لم تكن كذلك فهناك خطأ ما إما في النموذج أو في فهم المشكلة، كلاهما يحتاجان للتعديل حتى يتوافقا، لذلك يجب تصحيح التصور العقلي الأولي [3].

### 3-5 كيفية الاستغناء عن النموذج:

كما ذكرنا في المقدمة، انه من غير الواقعي الحصول على نتائج واقعية ومفهومة وذات معنى عندما يتم البدء بنموذج معقد منذ بداية المشروع، فهناك عدد كبير من المتحولات والقضايا التي تؤثر على النتائج، [3].

بالنسبة للممذجين المبتدئين، رد فعلهم الأولي، عند ما يحصلون على نتائج غامضة، بأن هنالك شيء خاطئ في البرنامج من الممكن أن يكون بسبب تقييد البرنامج مما يعطي حل غير ملائم أو ليس له معنى إطلاقاً، انه من المهم ملاحظة أن البرنامج قوي جداً، فبإمكانه أن يتبع مسار ملايين المعلومات ويقوم بالحسابات التكرارية والتي هي أبعد بكثير من قابلية العقل الإنساني، فبدون البرنامج لن يكون ممكناً عمل مثل هذه الأنواع من التحليلات، فالبرامج لوحدها تعتبر ناطقة عددية قوية جداً ولكنها جوهرياً غيبية جداً، لافتقادها حس المنطق، بالمقابل، العقل الإنساني يمتلك قابلية المنطق والتفكير، لكن له تقييدات هامة وهي الاحتفاظ بالكميات الكبيرة للبيانات الرقمية [3].

إن ما يجعل النمذجة العددية قوية جداً هو هذا المزيج بين العقل الإنساني والقابلية الحاسوبية، لا يستطيع أن يقوم أحدهما بالمهمة بشكل منفرد، فالبرامج تستطيع أن تكون فعالة تحت توجيه وإرشاد المنذج.

فإذا لم تتبع خطوات بناء النموذج التي تم الإشارة إليها سابقاً، فإن عمل النمذجة عادة ما يتطلب وقتاً ومالاً إضافياً أكثر إذا لم تتبع مفاهيم النمذجة الموصى بها.

تعتبر البرامج جيدة فقط إذا كانت قدرة المبرمج على التوجيه والقيادة جيدة كذلك، فهناك أسئلة أساسية يتم وضعها قبل البدء بأي نموذج مثلاً: ما هو الهدف الأساسي من عمل التحليل؟ ما هي الأسئلة الهندسية الرئيسية والتي تحتاج لأجوبة (مثل ما هو سبب انهيار منحدر ما ذو مواصفات جيومتريّة وجيوتكنيكية محددة، هل كان شكل المنحدر سبباً في انهياره أم أن مواصفات تربة المنحدر قد أثرت بشكل أكبر على انهياره) ما هي النتائج المتوقعة، وعلينا أن ندرك أن مجرد الحصول على البرنامج لا يجعلنا ماهرين بالنمذجة وإنما النمذجة العددية هي مهارة يمكن اكتسابها بالوقت والتجربة كما أن هذه المحاكاة والتساؤلات التي يجعلنا البرنامج نقوم بها هي التي تستطيع أن تزودنا بأفكار لفهم العمليات الفيزيائية الحقيقية والمعقدة جداً فحسب (Anderson and Woessner(1992)

(جاذبية النمذجة أنها تدمج دقة الحكم الإنساني بقوة الحاسب الإلكتروني).

(The attraction of Modeling is that it combines the subtlety of human judgment with the power of the digital computer)

فالنمذجة بكافة أشكالها هي مكون أساسي وضروري في الهندسة الجيوتكنيكية وبدونها فان مثلث Burland لن يكون كاملاً.

## الفصل الرابع

### طريقة العناصر المحدودة وتقنية تخفيض مقاومة القص

### Finite Element Method & Shear Strength Reduction Technique

#### 1-4 مقدمة:

تعتبر طريقة العناصر المحدودة FEM تقنية تحليل عددية للحصول على الحلول الدقيقة لأنواع مختلفة من المشاكل الهندسية فعلى الرغم من أنها قد طوّرت في الأصل لتستخدم في دراسة الإجهادات على تراكيب هياكل الطائرات المعقدة إلا أنها من ذلك الوقت قد تم تطويرها لتطبق بشكل واسع في مختلف المجالات الهندسية [5].

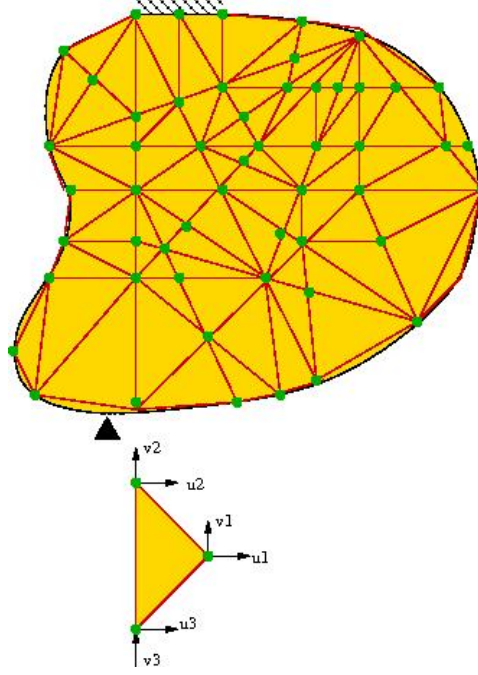
على الرغم من أن طريقة العناصر المحدودة قد ظهرت عام 1960 عندما استخدمت من قبل Clough لحل مسائل المرونة المستوية، إلا أن أفكار التحليل بالعناصر المحدودة تعود إلى تاريخ أبعد من ذلك بكثير، [5]، ففي عام 1943 استخدم Courant الطرق التغيرية Variational methods، ثم في 1956 قام كل من Martin and Topp، Clough، Turner باستخدام طريقة العناصر المحدودة لحساب الصلابة Stiffness وفي عام 1960 استخدمت FEM لحل المسائل المستوية عن طريق Clough. وفي السبعينات من القرن الماضي استخدمت طريقة FEM في التطبيقات على الحاسبات الكبرى، وفي الثمانينات طبقت الطريقة على الحواسيب الصغرى، وفي التسعينات من القرن الماضي استخدمت الطريقة في تحليل المنشآت الضخمة [6].

#### 2-4 التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة:

إن طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method (FEM) أو التحليل بالعناصر المحدودة Finite Element Analysis (FEA)، تعتمد على الفكرة التالية وهي أن: أي شكل معقد يمكن تقسيمه إلى مجموعة من العناصر الصغيرة التي يسهل التعامل معها، وهي فكرة بسيطة جداً وشائعة تستخدم في كل مكان في الحياة العملية كما في الهندسة [6]

إن الحل باستخدام طريقة العناصر المحدودة FEM يتم باعتماد الخطوات التالية [7]:

- 1- تقسيم المسألة المطلوب دراستها باستخدام طريقة العناصر المحدودة FEM إلى عدد من العناصر المحدودة كما هو مبين في الشكل (1-4).
- 2- البدء بحل كل عنصر من العناصر المحدودة باستخدام شبكة الإحداثيات المحلية "Local" لكل عنصر على حدى.
- 3- تجميع الحلول على شبكة الإحداثيات المحلية إلى حلول على شبكة الإحداثيات العامة "General".



الشكل (1-4) مسألة مدروسة تم تقسيمها إلى مجموعة من العناصر المحدودة

4- تدقيق الحل وفي حال كانت الحل غير متقاربة فإنه يجب إعادة الخطوتين 2-3.

5- تقييم الحل وذلك عندما تتلاقى الحلول.

قبل البدء بالحل، لابد من تعريف ما يسمى بـ العنصر Element: وهو عبارة عن قطعة صغيرة من

جسم عام يتم تمييزه بـ، [7]:

❖ نوعه هل هو (جائز، صفيحة، جملون.....)

❖ أبعاده وذلك إذا كان عنصر خطي (1-D): مثل (نابض، مثلث، جائز، أنبوب).

أو عنصر مستوي (2-D): مثل (قشرية، صفيحة، غشاء).

أو عنصر حجمي (3-D): مثل (إيجاد الانتقالات والإجهادات وسرعة التدفق)، [6]، [7]

❖ عقده وتوضعها بالنسبة للمسألة ككل هل هي (زاوية، داخلية....)، وعدد درجات الحرية لكل

عقده (الانتقالات والدورانات).

❖ تابع الشكل للعنصر.

### 3-4 النظرية الأساسية لحل المسائل المستوية:

تحت شروط الإجهادات والانفعالات الثابتة فإن تحليل المنشآت ثلاثية الأبعاد يمكن تخفيضه إلى

تحليل ثنائي البعد وعندها يمكن تقسيم مسائل المستوي إلى، [6]:

1- حالة الإجهادات المستوية:

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (\epsilon_z \neq 0) \quad (1-4)$$

2- حالة الانفعالات المستوية: توجد هذه الحالة في المنشآت الطويلة ذات المقطع العرضي الثابت

$$\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \quad (\sigma_z \neq 0) \quad (2-4)$$

#### 4-4 استخدام طريقة العناصر المحدودة في حل المسائل المستوية:

حيث أن الحل يعتمد على إيجاد علاقة الانتقالات التي تتضمن إيجاد تابع الشكل ومن ثم إيجاد الانفعالات وبالتالي فإن نوعية العناصر المحدودة التي تمثل سلوك المنشأ تعتمد بشكل كلي على اختيار تابع الشكل، فمعظم العناصر المستوية هي إما عناصر مثلثية (خطية أو تربيعية) أو عناصر رباعية الأضلاع [6].

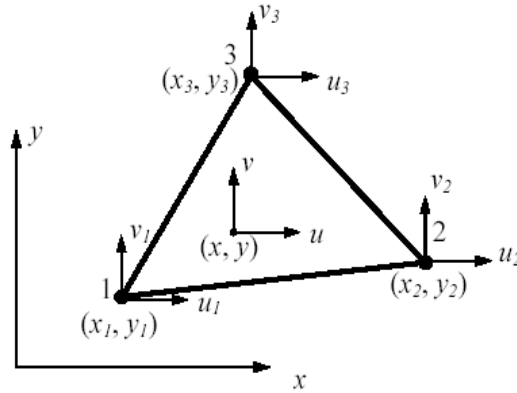
#### 5-4 أنواع العناصر المحدودة المستوية:

##### 1-5-4 مثلث الانفعال الثابت CST or T3

إذ يعتبر من أبسط وأسهل العناصر المستوية، فهو عبارة عن مثلث له ثلاث عقد ولكل عقدة درجتين حرية (انتقال ودوران)، ترقيم العقد يتم باتجاه معاكس لعقارب الساعة، كما يمكن تسميته بـ عنصر مثلثي خطي لأن الانتقالات تكون خطية على طول العنصر، وبالتالي تكون الانفعالات وكذلك الإجهادات ثابتة على طول العنصر. الشكل (2-4) [6], [8] :

إن استخدام عنصر الانفعال الثابت CST يتم [6]:

- ❖ أثناء التحليل الأولي والسريع للمسائل المستوية.
- ❖ عندما يتم نمذجة المسائل التي يكون فيها ميل الانفعال صغيراً.
- ❖ يستخدم في توليد المقاطع الانتقالية للشبكة.



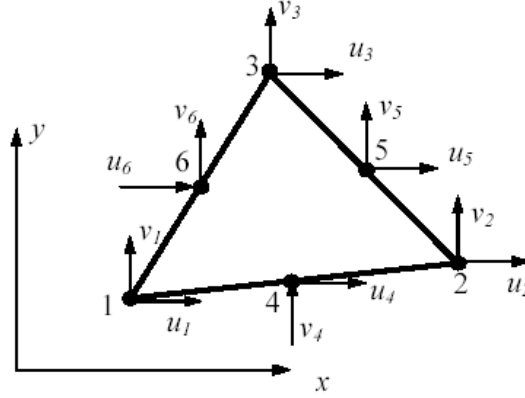
الشكل (2-4) مثلث الانفعال الثابت

وفيما عدا ذلك فإن استخدام مثلث الانفعال الثابت يعطي قيم غير دقيقة عند نمذجة مسائل الانعطاف، حيث أنه يعطي قيم خاطئة لاجهادات القص، [8].

##### 2-5-4 مثلث الانفعال الخطي LST or T6

يتألف العنصر من ستة عقد، ثلاثة عند الرؤوس وفي وسط كل عنصر يوجد عقدة الشكل (1-4)، لكل عقدة درجتين حرية وتوابع الانتقال هي توابع تربيعية [6].





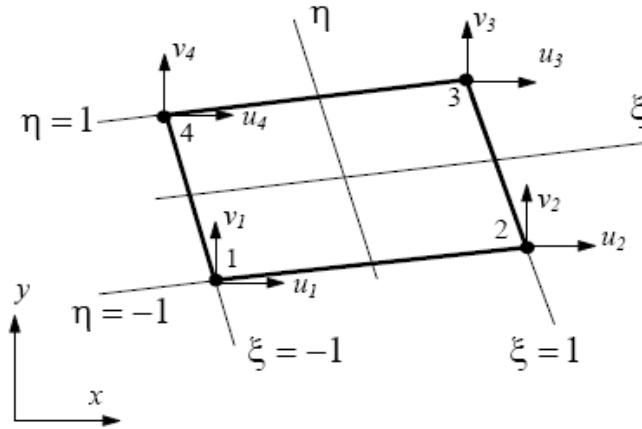
*Quadratic Triangular Element*

الشكل (3-4) مثلث الانفعال التربيعي

وهو يعطي نتائج أفضل عند مقارنته بمثلث الانفعال الثابت CST، ويطلق عليه في بعض الأحيان عنصر مثلثي تربيعي.

#### 3-5-4 عنصر خطي رباعي الأضلاع (Q4): Linear Quadrilateral Element

يحتوي هذا العنصر على أربع عقد في زوايا الشكل الرباعي، الشكل (4-4) ففي هذا العنصر فإن الانفعال يتغير خطياً في الاتجاهين، وبالتالي يمكن استخدام هذا العنصر لدراسة سلوك جوائز تحت تأثير عزم متغير على طول الجوائز [8]، وهناك ميزة ثانية لهذا العنصر وهي أن توابع الانتقال تجبر زوايا الشكل الرباعي على أن تبقى مستقيمة دون أي انحناء أثناء الانفعال، وبعبارة أخرى، فإن جوانب العنصر تبقى مستقيمة ولكن الزاوية بين الجوانب هي التي تتغير أثناء انعطاف العنصر، وبالتالي فهو عنصر ذو صلابة كبيرة [8].

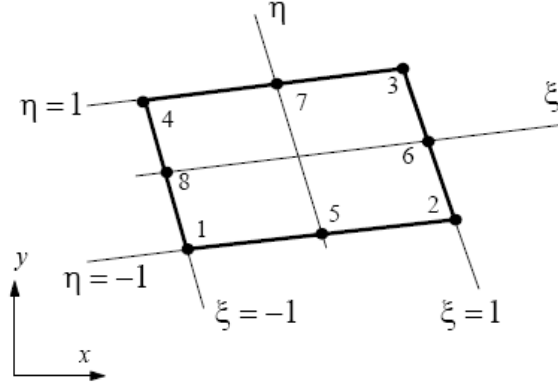


*Linear Quadrilateral Element*

الشكل (4-4) عنصر خطي رباعي الأضلاع

#### 4-5-4 عنصر خطي رباعي الأضلاع تربيعي (Q8): Quadratic Quadrilateral Element

وهو من أكثر العناصر المستخدمة في حل مسائل المستوي وهذا عائد إلى دقته العالية في التحليل والمرونة في نمذجته، الشكل (5-4)، [6]:



Quadratic Quadrilateral Element

الشكل (5-4) عنصر خطي رباعي الأضلاع تربيعي

ولهذا العنصر ثماني عقد، أربع عقد زاوية وعقدة في منتصف كل عنصر.

#### 6-4 طريقة العناصر المحدودة في الهندسة الجيوتكنيكية:

إن التقدم السريع والمستمر في الحاسوب دفع طريقة العناصر المحدودة FEM وطرق التحليل العددية الأخرى إلى طليعة التطبيقات الجيوتكنيكية، حيث أن أول تطبيق لـ FEM في الهندسة الجيوتكنيكية كان منذ عام 1966 فمنذ ذلك لاققت هذه الطريقة رواجاً كبيراً وذلك لقدرتها على القيام بتحليل العديد من المشاكل وعلى إعطاء نتائج واقعية، كما أنها تلائم جميع التطبيقات الهندسية ولديها القدرة على نمذجة سلوك المواد مثل مسار الإجهادات وأيضاً مسار الإجهادات- تغيرات ضغط ماء المسام، [9].

بدأ استخدام تقنية FEM في تحليل استقرار المنحدرات في منتصف السبعينات على شكل محاضرات في الجيوتكنيك والتي كانت مستندة على تعريف عامل الأمان للمنحدر والذي يشار إليه حالياً بـ تقنية تخفيض مقاومة القص (SSR) The Shear Strength Reduction Technique فقد تم استخدام طريقة SSR أو ما يسمى في بعض المراجع بـ SRM أي Shear Reduction Method من قبل Zienkiewicz et al في عام 1975، بعد ذلك تم تطبيق SRM من قبل Dawson et al Naylor، Matsui and San، Ugai and Leshchinsky، Donald and Giam، ومن ثم Griffiths Lane و Song and Zheng et al وغيرهم [10].

#### 7-4 تقنية تخفيض مقاومة القص The Shear Strength Reduction Technique:

بشكل عام، هنالك طريقتين لتحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة العناصر المحدودة [11].

التقريب الأول: يتم بزيادة حمولة الجاذبية الأرضية.

والتقريب الثاني: يعتمد على تخفيض خصائص مقاومة كتلة التربة

وبما أن عامل الأمان لا يعتمد على تعريف وحيد، وكان من أهمها التعريف الذي قدمه

Duncan, (1996): " هو نسبة مقاومة القص الفعلية إلى مقاومة القص الأصغرية اللازمة لمنع الانهيار "

أو العامل الذي يجعل مقاومة القص تنخفض إلى الحد الذي يجعل المنحدر على حافة الانهيار [9].

"By definition, the factor of safety of a slope is the "ratio of actual soil shear strength to the minimum shear strength required to prevent failure," or the factor by which soil shear strength must be reduced to bring a slope to the verge of failure"

في طريقة SSR مقاومة القص المفروضة "اللينة - المرنة" تابعة لمواد المنحدر، حيث أن الانهيار يحدث عند تناقص مقاومات القص للمواد تدريجياً، [9].

إن طريقة SSR تمتاز عن طرق التوازن الحدي بما يلي، [10]:

- ❖ يمكن إيجاد سطح الانهيار الحرج بشكل آلي، وذلك بتأثير ارتفاع قيمة انفعال القص الناتج عن تطبيق حمولات الجاذبية وتخفيض مقاومة القص.
- ❖ لا تحتاج هذه الطريقة إلى تحديد توزيع قوى القص بين الشرائح.
- ❖ تعتبر هذه الطريقة قابلة للتطبيق في العديد من الحالات المعقدة، وباستطاعتها إعطاء معلومات عن: الإجهادات، العزوم، وضغط ماء المسام، والتي كان من غير الممكن تحديدها باستخدام طرق التوازن الحدي.

#### 8-4 العوامل المؤثرة على استقرار المنحدرات باستخدام SSR:

هنالك ثلاثة عوامل رئيسية تؤثر على تحليل استقرار المنحدرات، وهي:

#### 1-8-4 أولاً: خواص مواد نموذج المنحدر Model material properties :

تطبق هذه الخاصية فقط في مسائل المستوي وفي حالة الانفعالات المستوية، حيث يتم استخدام نموذج مور- كولومب لوصف خواص المواد. حيث يتم تمثيل سطح الانهيار باستخدام نموذج مور- كولومب بحسب ما يلي، [11]:

$$f = \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{j_2} \left[ \cos \Theta - \frac{1}{3} \sin \Theta \sin \phi \right] - C \cos \phi \quad (3-4)$$

حيث:  $C$  : تماسك التربة.

$\phi$  : زاوية الاحتكاك

$$I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 3 \sigma m \quad (4-4)$$

$$j_2 = \left[ \frac{1}{2} (s_x^2 + s_y^2 + s_z^2) + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] \quad (5-4)$$

$$\Theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left[ \frac{3\sqrt{3}j_3}{2j_2^{1/2}} \right] \quad (6-4)$$

$$j_3 = (s_x s_y s_z) + 2(\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}) - s_x \tau_{yz}^2 - s_y \tau_{xz}^2 - s_z \tau_{xy}^2$$

$$s_x = \sigma_x - \sigma m, s_y = \sigma_y - \sigma m, s_z = \sigma_z - \sigma m$$

في نموذج مور- كولومب هنالك ستة خواص للمواد يجب تعريفها وهي [11]:

حيث: $C$ :	تماسك التربة.
$\phi$ :	زاوية الاحتكاك الداخلي.
$\gamma$ :	وزن واحدة الحجم للتربة.
$E$ :	معامل يونغ.
$\nu$ :	معامل بواسون.
$\psi$ :	زاوية التمدد الحجمي.

وأثناء دراسة هذه الخاصية تم ملاحظة ما يلي، [11]:

❖ سيقى تأثير كل من  $E$  و  $\nu$  ثابتاً، على الرغم من أن هذين العاملين يؤثران وبشكل عميق على التشوهات المحسوبة قبل انهيار المنحدر، ولكن تأثيرهما ضعيف على عامل الأمان المتوقع لتحليل استقرار المنحدر.

❖ تأثير زاوية التمدد الحجمي  $\psi$ : والتي تؤثر بشكل مباشر على التغيرات الحجمية أثناء تمدد التربة، وبحسب قانون تدفق المرونة فإن تأثير  $\psi$  يمكن أن يكون مرتبطاً 'associated' إذا تحققت العلاقة:  $\psi = \phi$

وغير مرتبط 'no associated' إذا تحققت العلاقة:  $\psi \neq \phi$  وبالتالي لن يتم إدخال تأثير التغيرات الحجمية أي  $\psi = 0$ .

❖ يبقى هنالك ثلاثة عوامل يتم إدخال تأثيرها أثناء نمذجة انهيار المنحدر هي  $C$  و  $\phi$  و  $\gamma$ .

#### 2-8-4 ثانياً: عامل الأمان وعامل تخفيض مقاومة القص

#### Factor of Safety "FOS" and Strength Reduction Factor "SRF":

إن انهيار أي منحدر يكون نتيجة لعدم قدرة مقاومة القص للكتلة المنزلقة التغلب على جهودات القص الفعلية. فعامل الأمان هو القيمة التي من خلالها يتم فحص حالة الاستقرار للمنحدرات، [11].

عندما  $FOS > 1$  عامل الأمان (Factor of Safety) فالمنحدر مستقر

$FOS < 1$  المنحدر غير مستقر.

حيث يتم حساب  $FOS > 1$ :

$$FOS = \frac{\tau}{\tau_f} \quad (7-4)$$

حيث  $\tau$  هي مقاومة القص لتربة المنحدر ويتم حسابها حسب معيار مور-كولومب:

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (8-4)$$

حيث  $\tau_f$  هي جهودات القص لسطح الانزلاق ويتم حسابها:

$$\tau_f = C_f + \sigma_n \tan \phi_f \quad (9-4)$$

حيث:

$$C_f = \frac{C}{SRF} \quad (10-4)$$

$$\phi_f = \frac{\phi}{SRF} \quad (11-4)$$

حيث أن SRF هي عامل تخفيض مقاومة القص، من الضروري أن يتم تتبع قيمة عامل الأمان FOS التي تسبب الانهيار و ذلك للوصول إلى قيمة عامل تخفيض مقاومة القص الصحيحة.

### **3-8-4 ثالثاً: انهيار المنحدر Slope Collapse :**

إن عدم تقارب الحلول Non-convergence ضمن عدد مرات التكرار number of iteration التي يحددها المستخدم في برنامج العناصر المحدودة يعتبر مؤشراً مناسباً لانهيار المنحدر المدروس. وهذا يعني أن توزيع الجهود المنحدر لم يعد كافياً ليحقق التوازن العام ومعيار مور-كولومب. فكل من انهيار المنحدر وعدم التقارب العددي يحدثان في نفس الوقت وهما مرتبطان بزيادة الانتقالات، عادة تحصل قفزة كبيرة في قيمة الانتقالات العقدية الأعظمية بعد الانهيار مباشرة و ذلك مقارنة مع القيمة التي تسبقها مباشرة قبل الانهيار، [11].

### **9-4 استخدام طريقة العناصر المحدودة في التحليل الستاتيكي للمسألة المدروسة**

#### **Finite Element Analysis of Static Problems**

إن المعادلة التي تمثل التوازن أثناء التحليل الستاتيكي باستخدام طريقة العناصر المحدودة يمكن كتابتها بالشكل المصفوفي التالي، [12]:

$$K\Delta U = P - F \quad (12-4)$$

حيث P: شعاع القوى المطبقة

F: شعاع القوى الداخلية

$\Delta U$ : شعاع الانتقالات العقدية الحالية.

في التحليل اللاخطي فإن القوى P يتم تطبيقها وفق سلسلة من خطوات التحميل Load step  $P_{(1)}, P_{(2)}, P_{(3)}$  إن تحليل العناصر المحدودة يتضمن حل المعادلة السابقة لإيجاد  $\Delta U$  و لـ n خطوة تحميل فإن المعادلة يتم حلها خلال عدة تكرارات Iterations بالشكل:

$$K\Delta U_{(i+1)} = P_n - F_i \quad (13-4)$$

من أجل تكرار  $i=0, 1, 2, 3, 4, \dots$

### **10-4 عملية الحل، التقارب و معيار التوقف**

#### **The Solution Process. Convergence and Stopping Criterion**

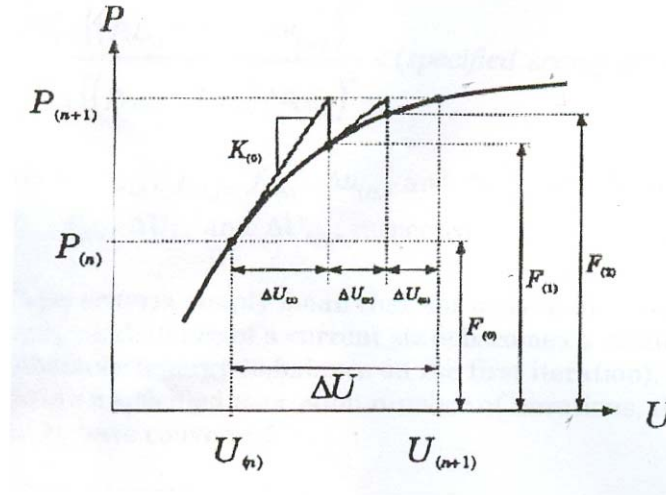
إن أفضل تعريف لعملية الحل بالعناصر المحدودة و التقارب Convergence يمكن شرحه باستخدام حالة بسيطة من تطبيق قوة وحيدة على نابض غير خطي ، في هذه الحالة فإن العلاقة بين القوة المطبقة P و الانتقالات U هي، [12]:

$$KU = P \quad (14-4)$$

حيث  $K=K(U)$  و هي الصلابة غير الخطية للناض و هي تابع للانتقالات، الاستجابة غير الخطية للناض تجاه الحمولة مبينة بالشكل (6-4):

لنفرض أن الحل موجود و هو قيم الانتقالات  $U_{(n)}$  بعد تطبيق خطوة التحميل  $P_{(n)}$  للناض، و المطلوب هو تحديد استجابة الناض، تزايد الانتقالات  $\Delta U$  Displacement Increment و هي موضحة بالشكل و ذلك عند تطبيق خطوة التحميل  $p_{(n+1)}$  و قبل تطبيق خطوة التحميل الجديدة فإن القوى المقاومة ( الداخلية )  $F_{(0)}$  في الناض بسبب حالة التشوه الحالية في التوازن نتيجة الحمولة المطبقة  $P_{(n)}$ .  
أولاً : نقوم بتقييم الصلابة المماسية  $K_{(0)}$  Tangent stiffness عند مبدأ منحنى القوة- الانتقالات، حيث أن برنامج  $Phase^2$  يستخدم طريقة الصلابة الأولية The Initial Stiffness Method و سيتم استخدام هذه الصلابة عند جميع التكرارات لخطوة التحميل الجديدة و بعدها سيتم حساب تزايد الانتقالات و تحديث الحل:

$$\begin{aligned} K_0 \Delta U_1 &= P_{n+1} - F_0 \\ \Delta U_1 &= K_{(0)}^{-1} (P_{n+1} - F_0) \\ U_{n+1} &= U_n + \Delta U_1 \end{aligned} \quad (15-4)$$



الشكل (6-4) الاستجابة غير الخطية للناض تبعاً للحمولة المطبقة و بدرجة حرية واحدة، و الإجراء المعتمد

باستخدام طريقة العناصر المحدودة لتحديد سلوك الناض تحت تأثير الحمولة المطبقة

من حالة الانتقالات الحالية يتم حساب القوى الداخلية  $F_1$  في الناض عند هذه المرحلة سيكون مقدار الخطأ كبيراً بين القيمتين  $(p_{n+1} - F_1)$  من الشكل نجد أن الغرض من التكرار هو تقليص عدم توازن الحمولة إلى الصفر أو على الأقل إلى رقم صغير جداً.

عند التكرار الثاني: سيتم البدء بقيمة أكثر دقة للانتقالات  $U_{n+1}$  و يتم تطبيق نفس خطوة التحميل  $P_{n+1}$  في هذه الحالة سنحصل على تزايد الانتقالات  $\Delta U_2$  و الذي هو أصغر من التزايد  $\Delta U_1$  من التكرار السابق، بإتباع الإجراء السابق سيتم حساب القوى الداخلية  $F_2$  و التي هي أقرب للتوازن للحمولة المطبقة.

بشكل نموذجي، نكمل التكرارات و عندها ليس فقط عدم توازن الحمولة ( $p_{n+1} - F_i$ ) تصبح أصغر و أصغر، بل تزايد الانتقالات  $\Delta U_i$  سيقترب من قيمة الصفر.

يتم تقرير إنهاء الحلول عندما تصبح النتائج "قريبة كفاية" تبعاً لمعيار التوقف أو المعايير Criteria، في برنامج Phase<sup>2</sup> هنالك خيارين لمعايير التوقف:

❖ الطاقة المطلقة Absolute Energy

❖ طاقة الجذر التربيعي Square Root Energy

## الفصل الخامس

### تطبيق برامج SLIDE 5 - PHASE2 في دراسة النموذج المدروس

### PHASE<sup>2</sup> - SLIDE 5 & Studying Models

#### 1-5 برنامج PHASE2:

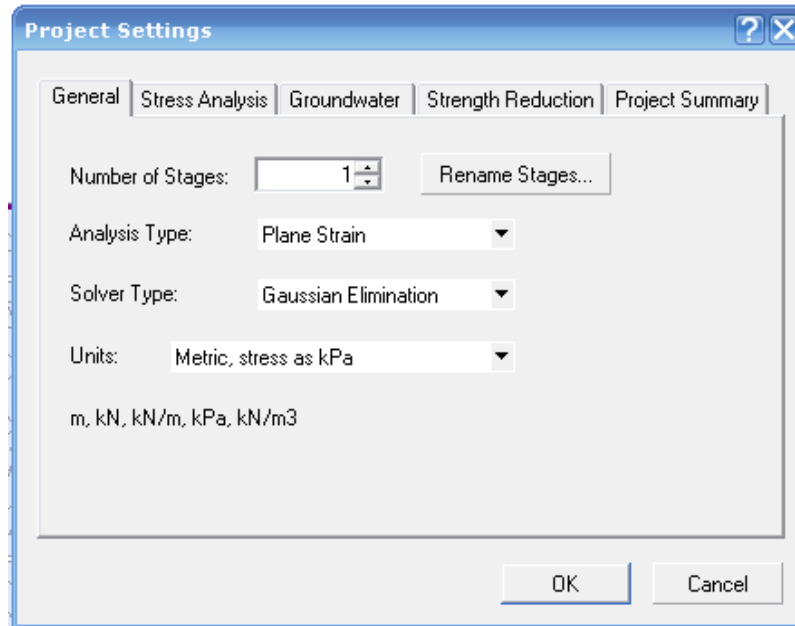
إن برنامج PHASE2 يعتمد طريقة العناصر المحدودة FEM في المستوي لحساب الإجهادات والانفعالات حول المنشآت تحت الأرضية المفتوحة، كما يمكن استخدامه لحل مسائل الأنفاق، وكثير من مسائل الهندسة المدنية والجيوتكنيكية ومنها [12]:

Phase2 6.0 is a powerful 2D elasto-plastic finite element stress analysis program for underground or surface excavations in rock or soil. It can be used for a wide range of engineering projects and includes support design, finite element slope stability and groundwater seepage analysis.

- ❖ الحفريات في الصخور أو التربة.
- ❖ الحفريات التي تتطلب مراحل والتي قد تصل إلى 300 مرحلة Multi-Stage excavation.
- ❖ المواد المرنة أو اللدنة.
- ❖ المواد المختلطة..... وغيرها.

#### 2-5 مرحلة تحضير النموذج ضمن برنامج PHASE<sup>2</sup>

إن استخدام برنامج PHASE<sup>2</sup> في تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR يعتمد وبشكل رئيسي على تحديد شروط المسألة المدروسة عن طريق مربع الحوار Project Settings فمن خلال هذا الخيار يتم تعريف واحداث المسألة المدروسة وسيتم اعتماد الواحدات المترية لقياس الأطوال أما واحدة قياس الإجهادات والكثافة فهي KPa، [12] الشكل (1-5).



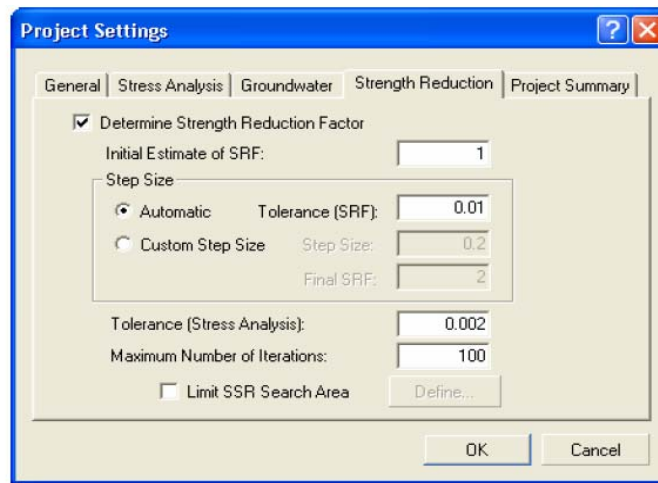
الشكل (1-5) خيارات مربع الحوار Project Settings



كما يمكن تحديد نوع التحليل باختيار Plane Strain، وعن طريق نافذة Strength Reduction يتم اختيار خيار تخفيض مقاومة القص باستخدام طريقة SSR وذلك عن طريق تفعيل خيار Determine Strength Reduction Factor كما هو موضح بالشكل (5-2)، وضمن هذا الخيار يتم فرض قيمة ابتدائية لعامل تخفيض القص SRF بـ (1) كما يترك حساب حجم الخطوة Step Size بين قيمة عامل تخفيض القص SRF المحسوب والقيمة التي تليه بشكل اتوماتيكي ليحدده البرنامج وذلك وفق العلاقة التالية، [12]:

$$SRF_n = SRF_{n-1} \pm \frac{|SRF_{n-2} - SRF_{n-1}|}{2} \quad (1-5)$$

والتي من خلالها سيتم تحديد فيما إذا سيتم زيادة قيمة العامل SRF أو إنقاصه وذلك لحساب عامل الأمان FOS.



الشكل (5-2) تفعيل خيار SSR للنموذج المدروس

ضمن خيار حجم الخطوة يجب تحديد (SRF) Tolerance وهو ما يسمى (نسبة السماح) في قيمة عامل تخفيض المقاومة SRF وتتراوح قيم التحمل بين (0.01-0.001) حيث أن القيم الكبيرة (0.01) تسرع الزمن اللازم لحل النموذج، أما القيم الصغيرة فتستخدم لإعطاء الحلول الدقيقة [12]. من نافذة Project Summary ضمن مربع حوار Project Settings يتم كتابة اسم الملف ومعلومات عامة عنه.

### 3-5 مرحلة إدخال النموذج

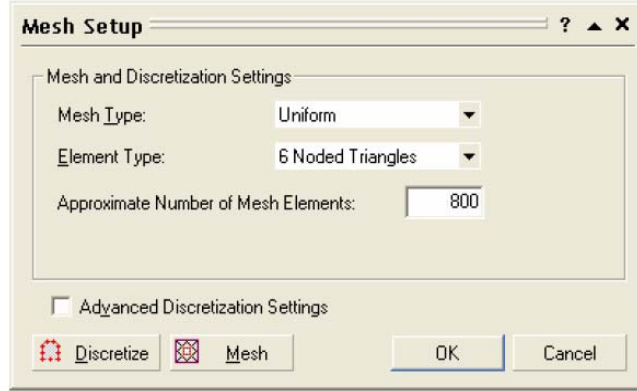
#### 1-3-5 حدود النموذج Boundaries

في هذه المرحلة سيتم تمثيل النموذج المدروس والمطلوب تحليله باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR عن طريق خيار Boundaries واستخدام خيار Add External وعن طريق هذا الخيار يتم إضافة إحداثيات المنحدر المدروس.



### 2-3-5 إسناد خيار الشبكة Meshing

عن طريق هذا الخيار سيتم تشكيل شبكة العناصر المحدودة ( نوع الشبكة، عدد العناصر، نوع العنصر المحدود)، في برنامج Phase<sup>2</sup> عملية إنشاء الشبكة تتم على مرحلتين، [12]:



الشكل (3-5) يبين خيار إسناد شبكة العناصر المحدودة

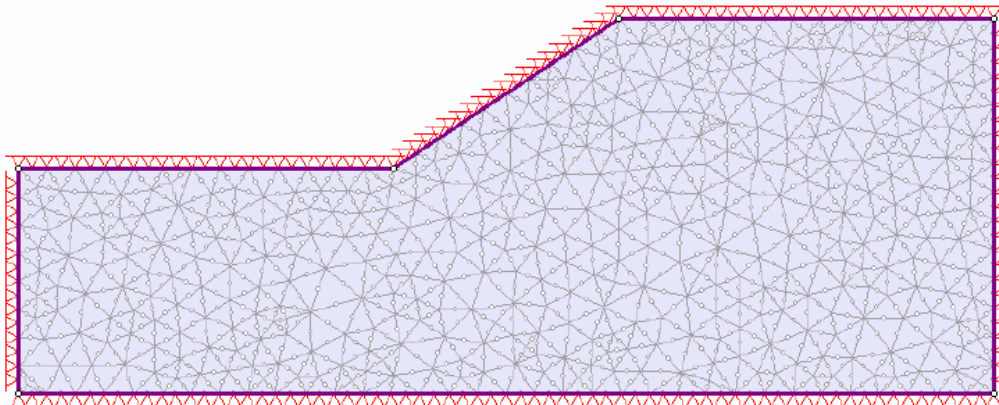
### 1-2-3-5 المرحلة الأولى Discretize:

وفيها يتم تقسيم حدود النموذج إلى مجموعة من الخطوط والتي تؤلف إطار شبكة العناصر المحدودة بعد إسناد هذا الخيار إلى المنحدر المدروس ستظهر حدود المنحدر وعليها صلبان حمراء تشير إلى مكان توضع عقدة العنصر المحدود على حدود النموذج، وضمن خيار Mesh يتم تحديد نوع شبكة العناصر المحدودة بأنها منتظمة Uniform ويتم تحديد نوع العنصر المحدود بأنه من النوع المثلثي بست عقد L6.



### 2-2-3-5 المرحلة الثانية Mesh:

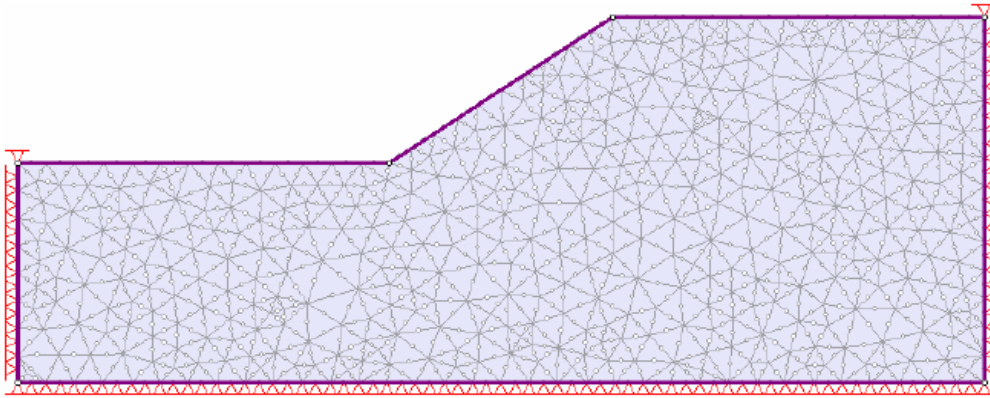
وفيها يتم توليد شبكة العناصر المحدودة، وبعد توليدها سيشير شريط الحالة إلى عدد العناصر المحدودة والعقد في شبكة العناصر المحدودة للمنحدر المدروس. الشكل (4-5) يبين المنحدر بعد إسناد خيار Mesh



الشكل (4-5) شبكة العناصر المحدودة للمنحدر المدروس والشروط الحدية الافتراضية

### 3-3-5 Boundary Conditions (شروط الاستناد)

بشكل عام عند تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR ستكون الانتقالات عند حدود النموذج حرة عند سطح الأرض للمنحدر المدروس وستكون المساند الخارجية لباقي حدود النموذج مثبتة في الاتجاهين XY، [12] كما هو مبين بالشكل (5-5):



الشكل (5-5) شروط الاستناد الحرة عند سطح الأرض للمنحدر المدروس

### 4-3-5 الإجهادات الحقلية Field Stress:

يسمح هذا الخيار بتعريف شروط الإجهادات ضمن الموقع، فعن طريق اختيار نوع الإجهادات بأنه Gravity يتم أخذ الجاذبية الأرضية بعين الاعتبار أثناء حساب الإجهادات.



**Field Stress Properties** [?] [X]

Field Stress Type: Gravity [v]  Use actual ground surface  Use effective stress ratio

Ground Surface Elevation (m):

Unit Weight of Overburden (kN/m<sup>3</sup>):

Total Stress Ratio (horiz/vert in plane):

Total Stress Ratio (horiz/vert out-of-plane):

Locked-in horizontal stress (in plane) (kPa, Comp. +):

Locked-in horizontal stress (out-of-plane) (kPa, Comp. +):  Advanced >>

OK Cancel

الشكل (6-5) الإجهادات الحقلية

### 5-3-5 خواص المواد Material Properties:

في هذه المرحلة يتم تعريف خواص مواد تربة المنحدر المدروس، وفيها يتم إدخال قيم كل من الكثافة وعامل يونغ E وعامل بواسون وعند إدخال بارمترات المقاومة يجب التأكد من أن معيار الانهيار هو مور- كولومب، وأن نوع المواد لدن Plastic وهذا يعني أن المواد مطاوعة وبالتالي تصل للانهيار، كما أن قيمة زاوية التمدد الحجمي Dilatation Angle=0° وهذا يدل على عدم تمدد حجم التربة عند حدوث القص، [12] الشكل (7-1):



الشكل (5-7) خواص مواد تربة المنحدر المدروس

#### 4-5 مرحلة حساب النموذج Compute:

بعد الانتهاء من تحضير وإدخال النموذج، يتم حساب نموذج المنحدر المدروس باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR، فمن خلال هذا الخيار يمكن تنفيذ تحليل الإجهادات للنموذج الحالي باستخدام العناصر المحدودة، مع ملاحظة ما يلي، [12]:

❖ إن خيار Compute لا يمكن تفعيله في حال كانت شبكة العناصر المحدودة للنموذج غير موجودة.

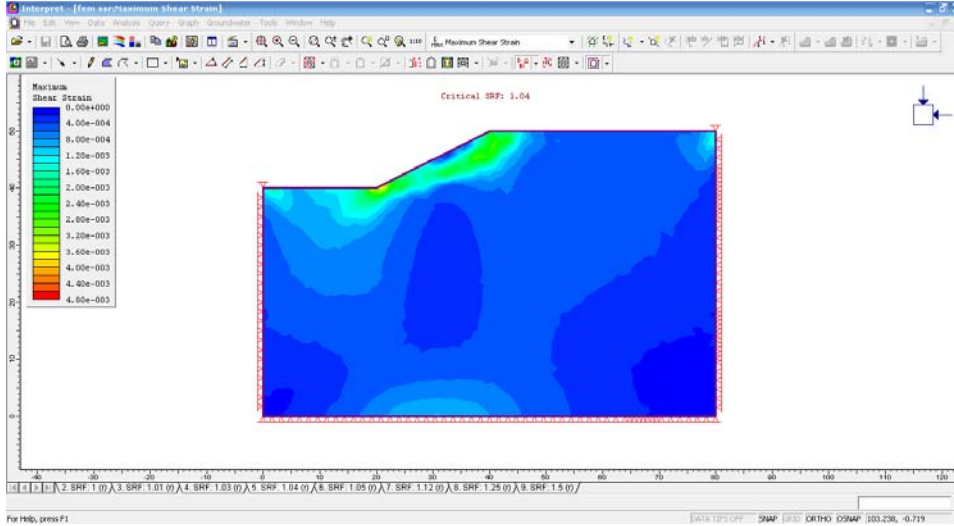
❖ لا يمكن للبرنامج أن يقوم بعملية التحليل في حال لم يتم حفظ النموذج، وسيعطي البرنامج تذكير للمستخدم بضرورة الحفظ.

❖ في حال أراد المستخدم ولسبب من الأسباب إيقاف التحليل بعد اختيار Compute، يستطيع إنهاء التحليل عن طريق اختيار زر Abort من قائمة Compute.

#### 5-5 مرحلة إظهار النتائج

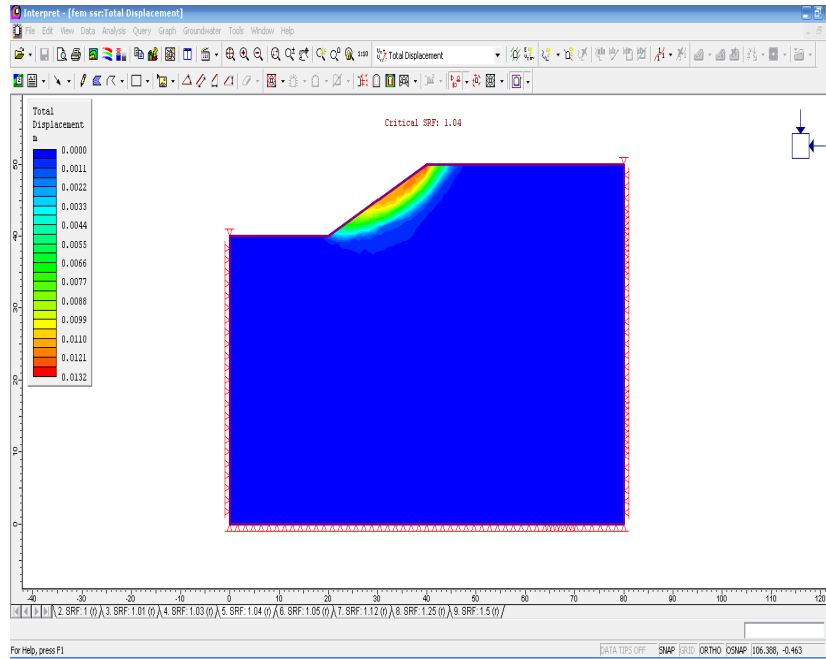
##### 1-5-5 وحدة تفسير نتائج النموذج Interpret:

بعد أن يبدأ برنامج تفسير النتائج ويتم قراءة نتائج التحليل ستظهر نافذة كما في الشكل (5-8) تحتوي على قيمة عامل تخفيض مقاومة القص الحرج Critical Strength Reduction Factor (SRF)، حيث سيظهر أسفل الشاشة القيم المختلفة لعامل تخفيض مقاومة القص SRF وبشكل افتراضي عند بدء برنامج الترجمة سيظهر على الشاشة قيمة عامل تخفيض مقاومة القص الحرج Critical SRF وعند التنقل بين قيم عامل تخفيض مقاومة القص يمكن تكوين صورة جيدة عن تطور انهيار المنحدر المراد تحليل استقراره باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR، [12].



الشكل (8-5) عامل تخفيض مقاومة القص الحرج بعد التحليل

ميزة أخرى من ميزات ترجمة النتائج هي إمكانية مشاهدة تطور الانهيار، ميزة إضافية هي إمكانية مشاهدة ورسم خطوط تساوي الانتقالات الكلية للمنحدر Total Displacement، الشكل (9-5) يبين الانتقالات الكلية للمنحدر المدروس:

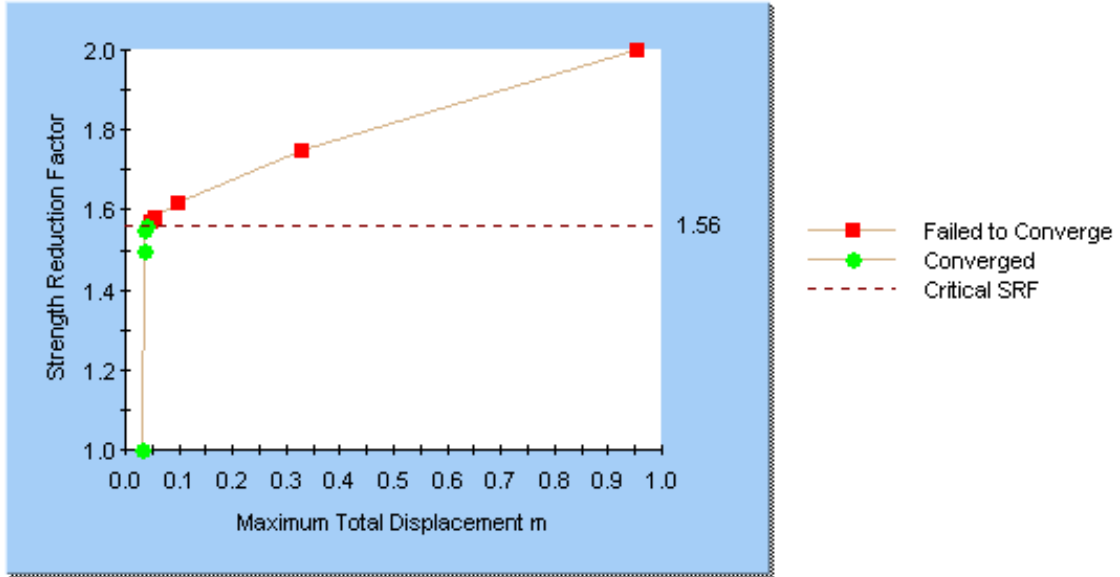


الشكل (9-5) الانتقالات الكلية للمنحدر المدروس

عند إجراء تحليل استقرار المنحدر باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR يمكن رسم مخطط الانفعالات العظمى Maximum Deformation وعامل تخفيض مقاومة القص SRF، فكلما انخفضت المقاومة تزداد قيم الانتقالات الأعظمية وعند نقطة معينة سينهار المنحدر وستزداد التشوهات بشكل متسارع والتحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة لن يتقارب not Converge، نقطة عدم تقارب حلول العناصر المحدودة للمنحدر المدروس هي ما يعرف بعامل تخفيض مقاومة القص الحرج Critical SRF، بمعنى آخر يمكن القول أنه عندما تزداد

الانفعالات بشكل كبير تكون النقطة الفاصلة بين القيم الصغيرة للانفعالات والقيمة التي تزداد بعدها الانفعالات بشكل كبير تكون نقطة عامل تخفيض مقاومة القص الحرج Critical SRF، هذه تعتبر واحدة من أهم ميزات تحليل SSR [12]، الشكل (10-5) يبين مخطط عامل تخفيض مقاومة القص الحرج والانتقالات العظمى.

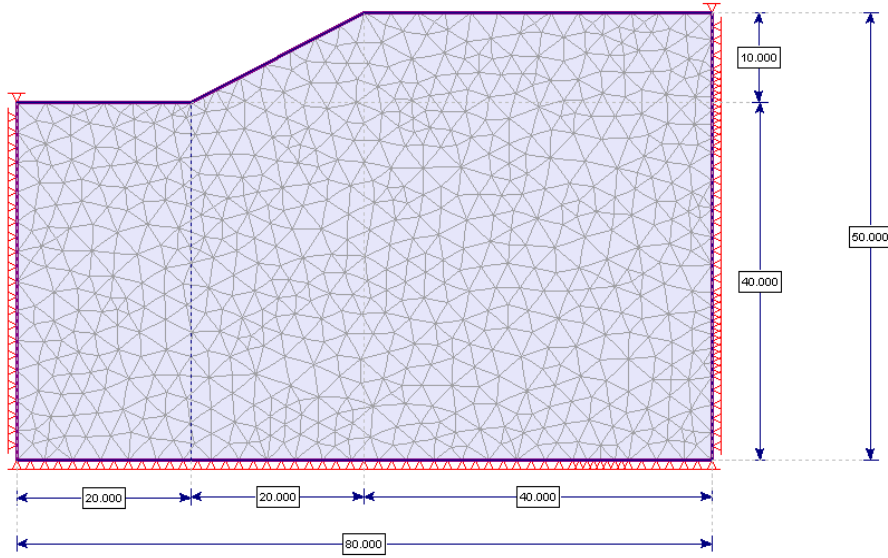
**Shear Strength Reduction - Critical SRF: 1.56 at Displacement: 0.039 m**



الشكل (10-5) مخطط عامل تخفيض مقاومة القص الحرج والانتقالات العظمى

## 6-5 النموذج المدروس باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص باستخدام تقنية العناصر المحدودة:

إن المنحدر المدروس هو منحدر متجانس أبعاده الهندسية موضحة بالشكل (11-5):

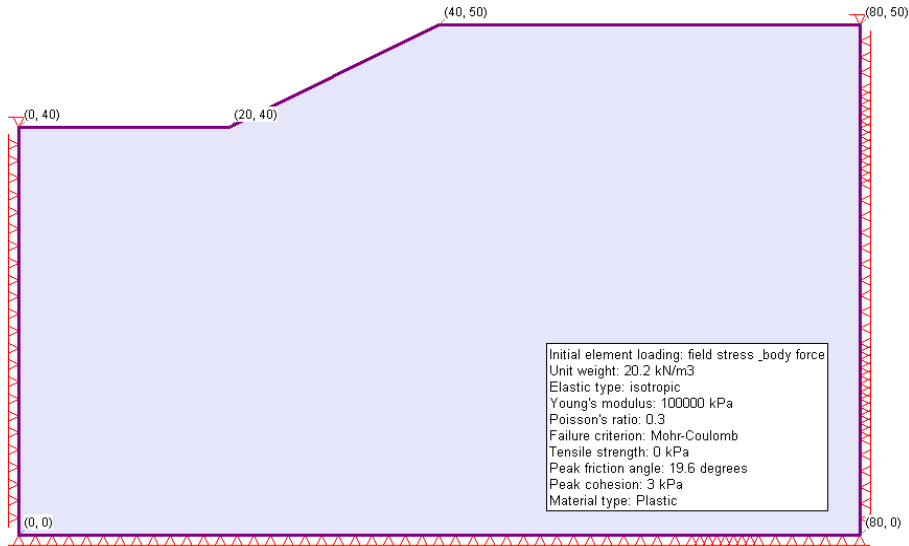


الشكل (11-5) الأبعاد الهندسية للمنحدر المدروس

الخواص الميكانيكية للمنحدر هي:

C (KPa)	$\phi$ (Degree)	E (KPa)	$\nu$	$\gamma$ (KN / m <sup>3</sup> )
3	19.6	100000	0.3	20.2

مبينة بالشكل (12-5):

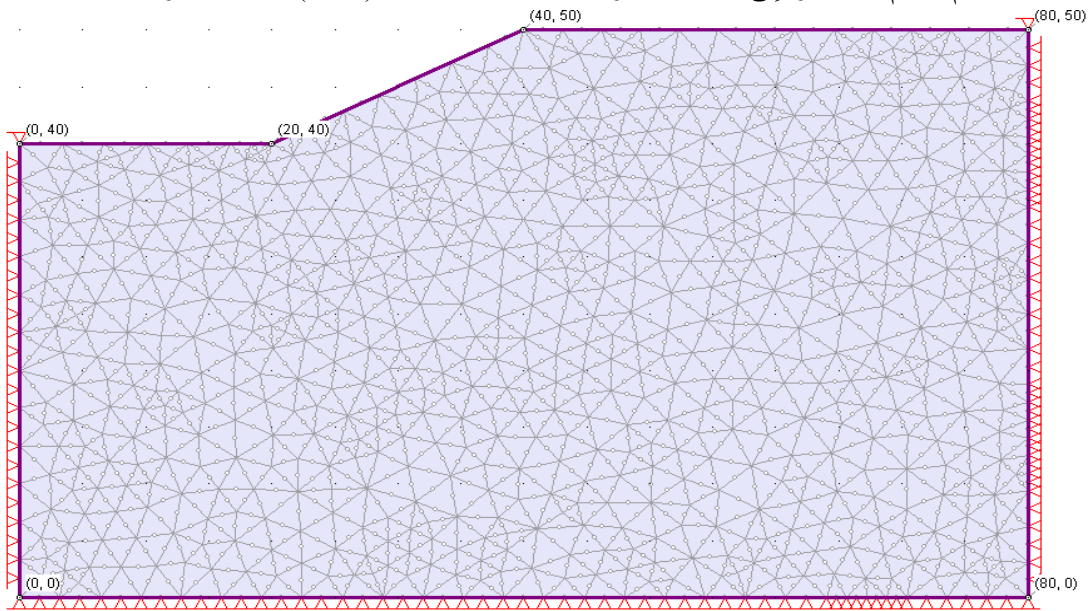


الشكل (12-5) الخواص الميكانيكية للمنحدر المدروس

المنحدر المدروس قبل القيام بعملية التحليل باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR حيث تم إسناد خواص مواد المنحدر للنموذج المدروس، مسانده، وشبكة العناصر المحدودة وهي عبارة عن عنصر مثلثي تربيعي T6



حيث تم تقسيم المنحدر إلى 1325 عنصر و 2740 عقدة، الشكل (5-13) يبين المنحدر قبل التحليل

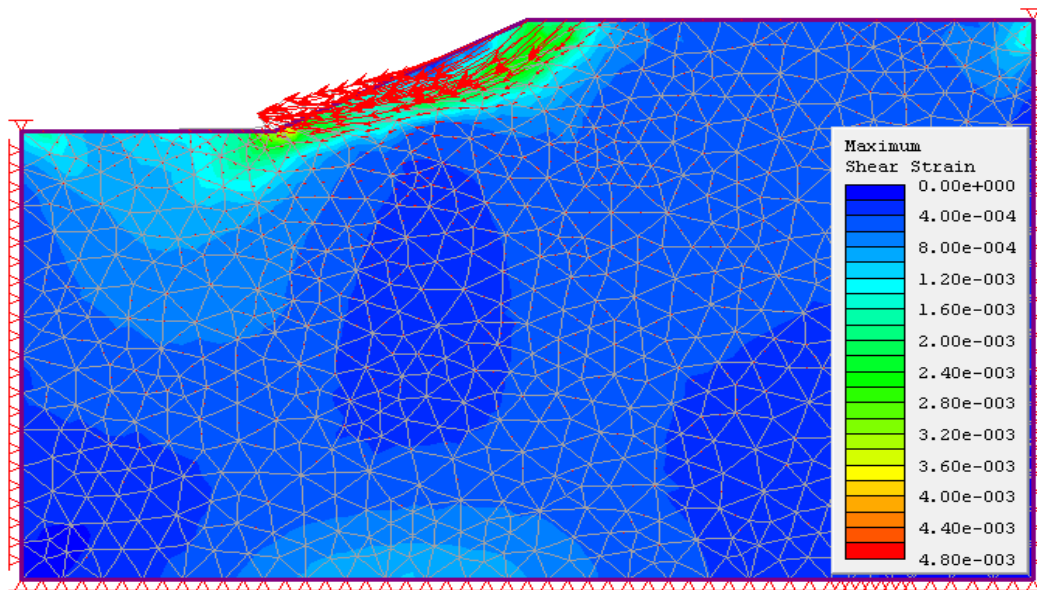


الشكل (5-13) المنحدر قبل التحليل

المنحدر المدروس بعد القيام بعملية التحليل باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR حيث

كانت قيمة عامل الأمان = 1.04

Critical SRF: 1.04

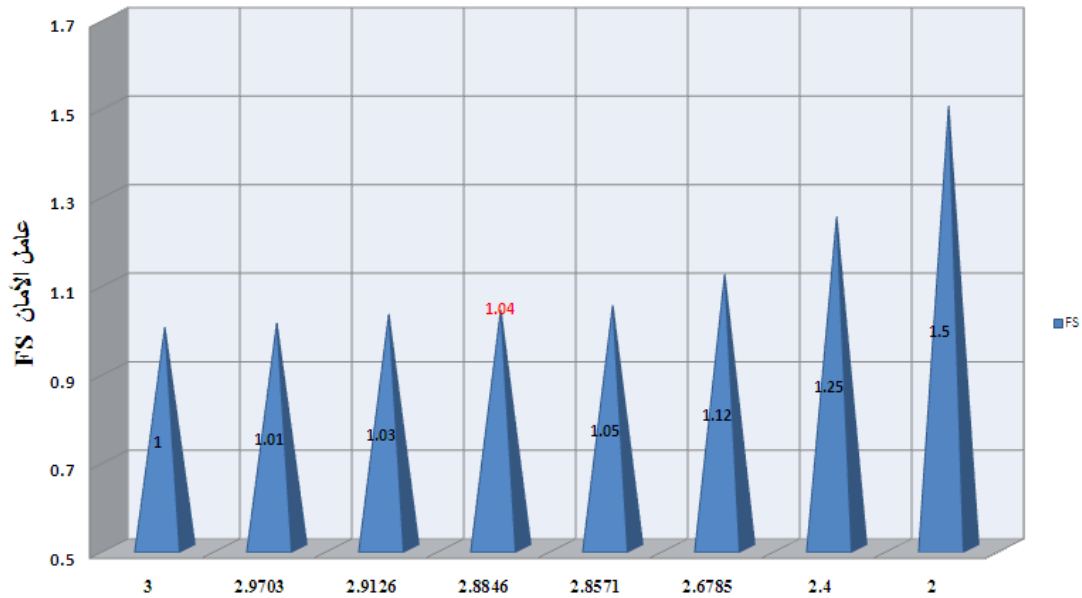


الشكل (5-14) المنحدر وشعاع التشوهات وشبكة العناصر المحدودة المشوهة بعد الانتهاء من عملية التحليل

باستخدام SSR

وباستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR كانت قيم التماسك المخفضة كالتالي، الشكل (5-15):



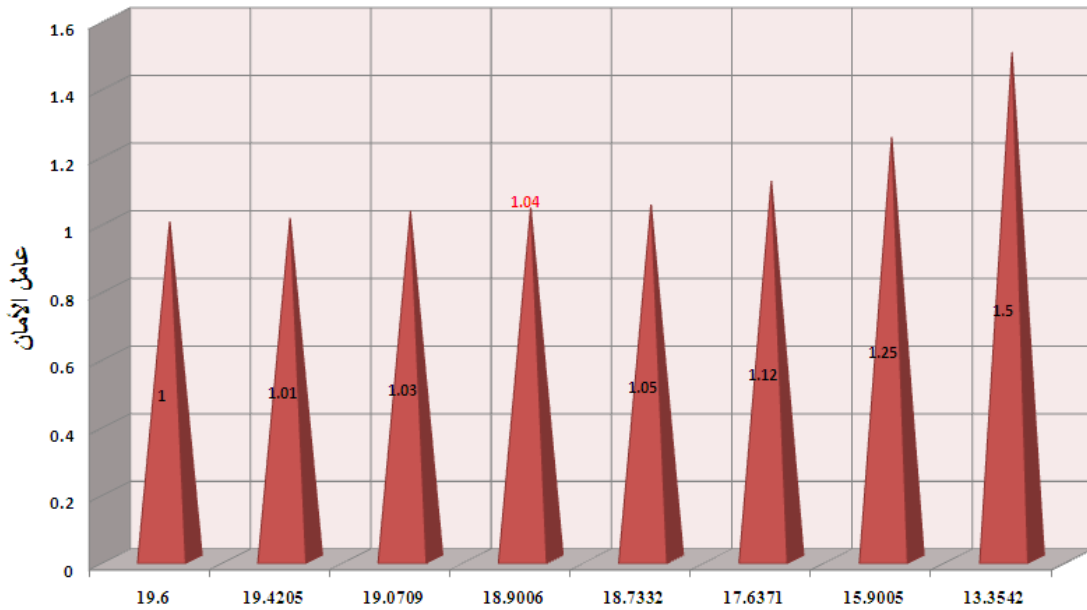


$$C^* = \frac{C'}{F} \quad (\text{KPa})$$

الشكل (5-15) قيم تخفيض التماسك أثناء التحليل باستخدام SSR

الشكل (5-16) يبين المنحدر المدروس بعد القيام بعملية التحليل باستخدام طريقة تخفيض مقاومة

القص SSR حيث كانت قيم زاوية الاحتكاك أثناء وبعد التخفيض كالتالي:



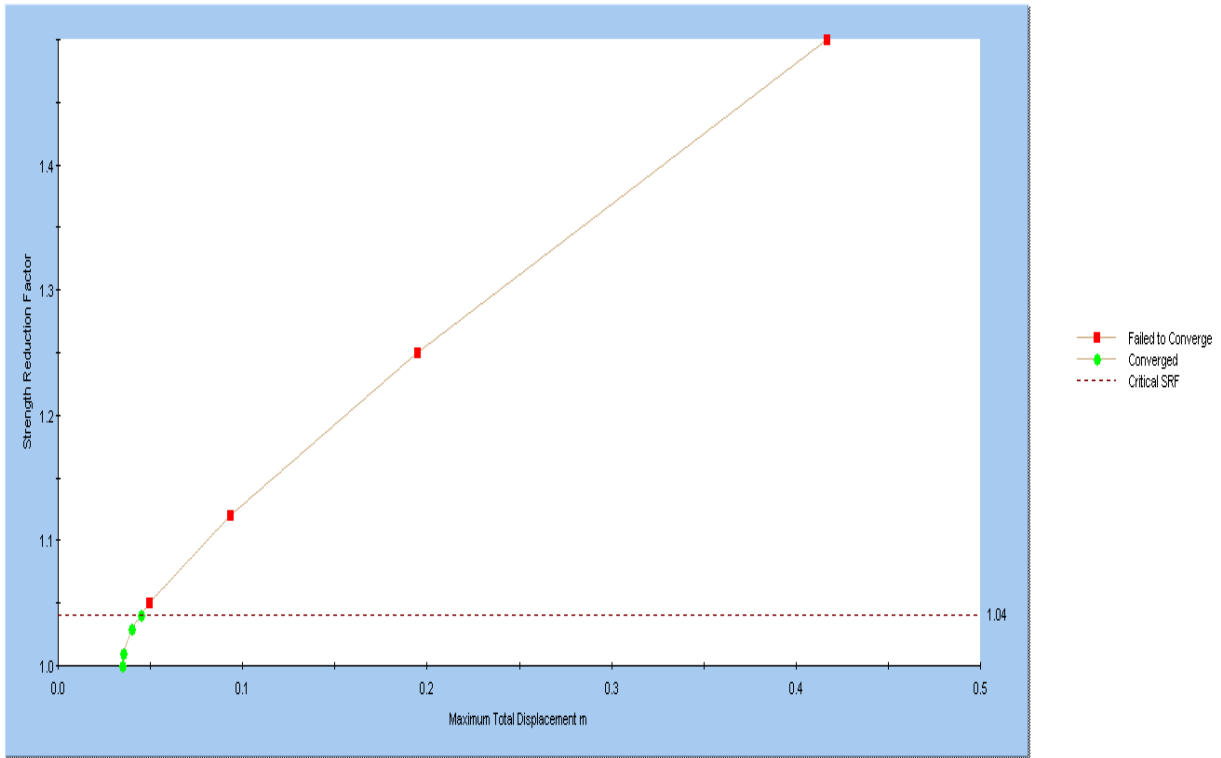
$$\phi^* = \arctan \left[ \frac{\tan \phi'}{F} \right] \quad (\text{Degree})$$

الشكل (5-16) قيم زاوية الاحتكاك أثناء وبعد استخدام طريقة SSR

باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR يمكن الحصول على مخطط عامل تخفيض مقاومة

القص مع الانتقالات الكلية الأعظمية، وهذا مبين بالشكل (5-17):

Shear Strength Reduction - Critical SRF: 1.04 at Displacement: 0.046 m



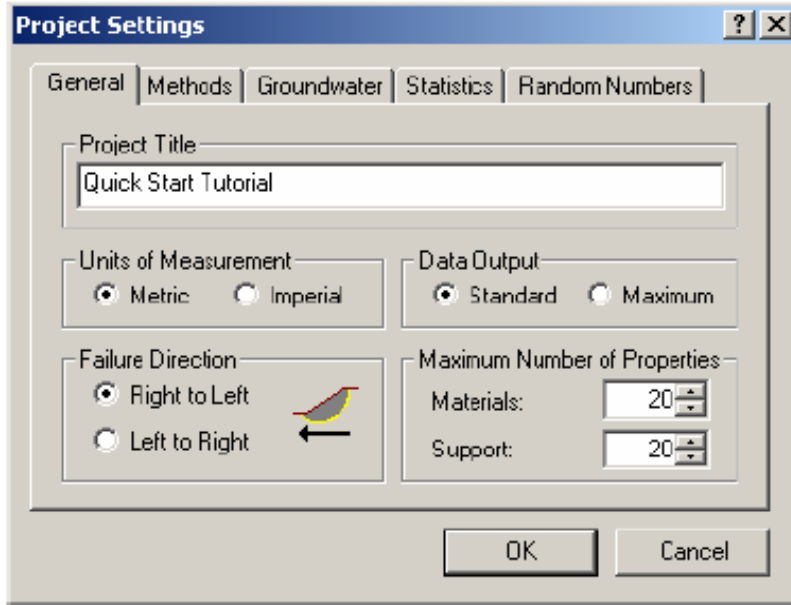
الشكل (17-5) عامل تخفيض مقاومة القص الحرج والانتقالات الأعظمية الكلية

## 7-5 برنامج SLIDE 5

إن برنامج Slide 5.0 يستخدم طرق التوازن التقليدي LEM لتقدير قيمة عامل أمان المنحدرات أوفي تقدير الانهيار المحتمل لسطوح الانزلاق الدائرية وغير دائرية للمنحدرات الموجودة في التربة أو ضمن الصخور.

### 8-5 مرحلة تحضير النموذج

إن تحديد عامل الأمان باستخدام برنامج Slide 5.0 يعتمد وبشكل رئيسي على تحديد شروط المسألة المدروسة عن طريق مربع الحوار Project Settings فمن خلال هذا الخيار يتم تعريف واحداث المسألة المدروسة وسيتم اعتماد الواحدات المترية لقياس أبعاد المنحدر [13]، الشكل (5-18).



الشكل (5-18) خيارات مربع الحوار Project Settings

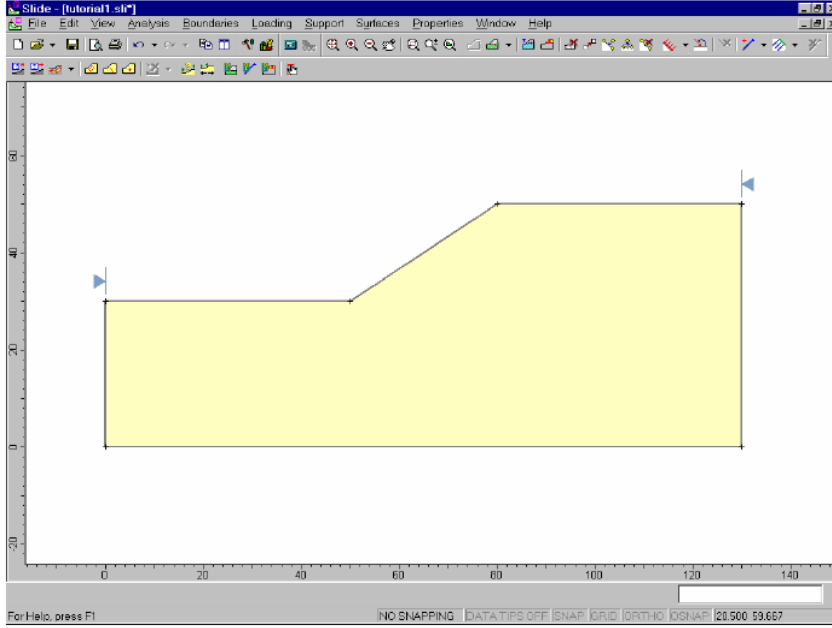
كما يمكن تحديد اتجاه الانهيار Failure Direction وطرق التحليل Analysis Methods.

### 9-5 مرحلة إدخال النموذج:

#### 1-9-5 حدود النموذج Boundaries:

في هذه المرحلة سيتم تمثيل النموذج المدروس والمطلوب تحليله باستخدام طريقة من طرق التوازن الحدي LEM عن طريق خيار Boundaries واستخدام خيار Add External وعن طريق هذا الخيار يتم إضافة إحداثيات المنحدر المدروس والشكل (5-19) يبين المنحدر بعد إضافة إحداثياته .

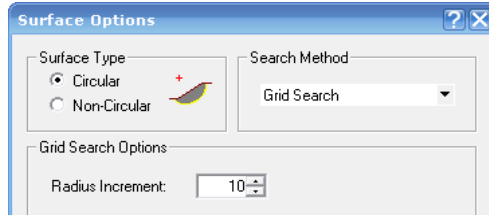




الشكل (19-5) المنحدر بعد إضافة إحدائياته

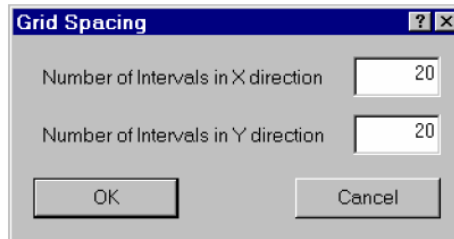
### 2-9-5 سطوح الانزلاق Slip Surfaces:

برنامج Slide يسمح للمستخدم بتحليل استقرار سطوح الانزلاق الدائرية وغير دائرية، فهو يعتمد في تحليل استقرار سطوح الانزلاق الفردية أو السطوح الحرجة على إيجاد سطح الانزلاق صاحب أصغر قيمة لعامل الأمان FOS، وسيتم إيجاد سطح الانزلاق الدائري باستخدام طريقة البحث الشبكي Grid Search [13]، الشكل (20-5) يبين خيارات سطوح الانزلاق.



الشكل (20-5) خيار سطح الانزلاق الدائري

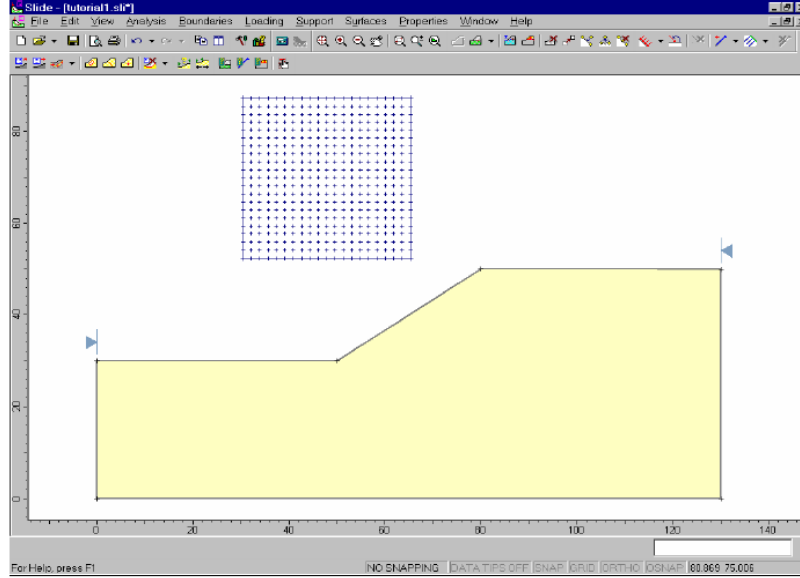
إن الحل بطريقة البحث الشبكي يتطلب تحديد مركز انزلاق واحد وهذا يتم القيام به عن طريق خيار Auto Grid ويمكن تحديد أكثر من مركز لشبكة الانزلاق ولكن في أغلب الأحيان شبكة وحيدة تكون كافية لتحليل المسألة المطلوبة ويتم استخدام القيم الافتراضية للمسافات بين مراكز شبكة سطوح الانزلاق المفترضة الشكل (21-5) يبين ذلك.



الشكل (21-5) خيارات تباعد الشبكة

بعد أن يتم تشكيل شبكة مراكز الانزلاق، فإن عدد المسافات بالاتجاهين (x,y) يكون قد تحدد وهذا يؤدي إلى تشكيل شبكة مراكز الانزلاق.

عدد المراكز في الشبكة = (عدد مسافات الشبكة في الاتجاه  $1+x$ ) \* (عدد مسافات الشبكة في الاتجاه  $1+y$ )، الشكل (22-5) يبين شبكة مراكز الانزلاق باستخدام خيار Auto Grid [13].



الشكل (22-5) شبكة مراكز الانزلاق باستخدام خيار Auto Grid

الافتراضي  $20*20$ ، وبالتالي عدد مراكز الانزلاق  $= 21*21 = 441$ .

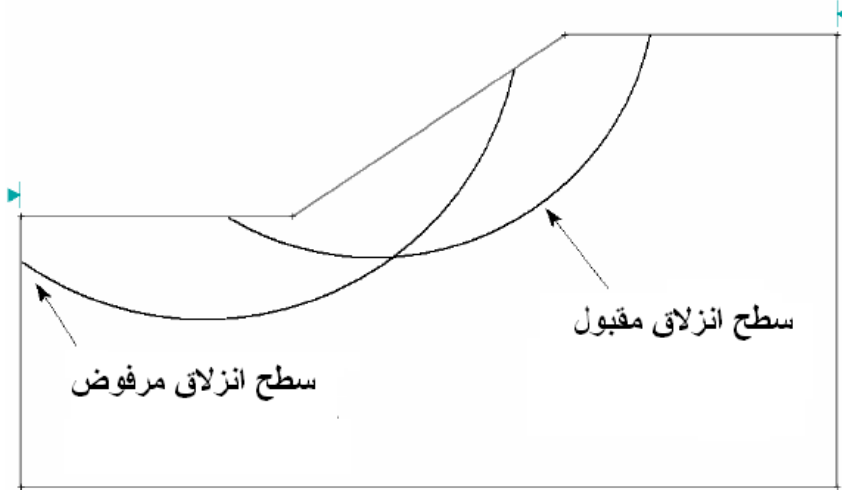
إن كل مركز من شبكة مراكز الانزلاق، يمثل مركز دوران لمجموعة دوائر (حلقات) الانزلاق [13].

### 3-9-5 حدود المنحدر Slope Limits

بعد أن يتم إدخال حدود المنحدر ستظهر وبشكل افتراضي علامتين على شكل مثلثين على يسار ويمين الحدود العليا لسطح المنحدر هذا ما يسمى بحدود المنحدر Slope Limits، هذه الحدود يتم حسابها بشكل اتوماتيكي بعد إنشاء حدود النموذج.

إن حدود النموذج تخدم هدفين لتحليل السطوح الدائرية وهما، [13]:

1- الفلترية Filtering: كل سطوح الانزلاق يجب أن تتقاطع مع الحدود الخارجية ضمن حدود المنحدر، إذا لم تكن نقطة بداية ونهاية سطح الانزلاق ضمن حدود المنحدر عندها سيتم استبعاد سطح الانزلاق، الشكل (23-5).

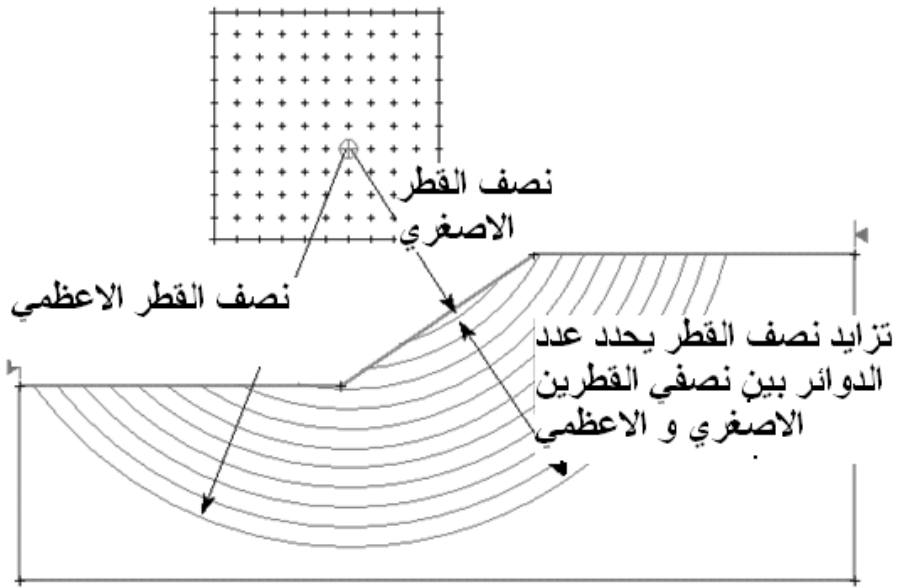


الشكل (5-23) فلتره سطوح الانزلاق الصحيحة من قبل حدود النموذج

2- تشكيل الدوائر Circle Generation: إن أجزاء الحدود الخارجية بين حدود النموذج تعرف سطح المنحدر المراد تحليل استقراره، ويستخدم سطح المنحدر لتوليد دوائر الانزلاق للبحث الشبكي Grid Search، كما يلي، [13]:

إن كل نقطة من شبكة مراكز الانزلاق تحدد أنصاف أقطار أعظمية وأصغرية بناءً على بعد مركز الانزلاق عن سطح المنحدر، الشكل (5-24).

إن ما يسمى بتزايد نصف القطر Radius Increment يستخدم لتحديد عدد دوائر الانزلاق المتولدة بين أنصاف الأقطار الأصغرية والأعظمية للدوائر عند كل نقطة ضمن الشبكة. إن تزايد نصف القطر هو عدد المسافات بين نصفي القطرين الأصغري والأعظمي عند كل نقطة شبكية وبالتالي عدد دوائر الانزلاق المتولدة عن كل نقطة شبكية يساوي إلى تزايد نصف القطر + 1.



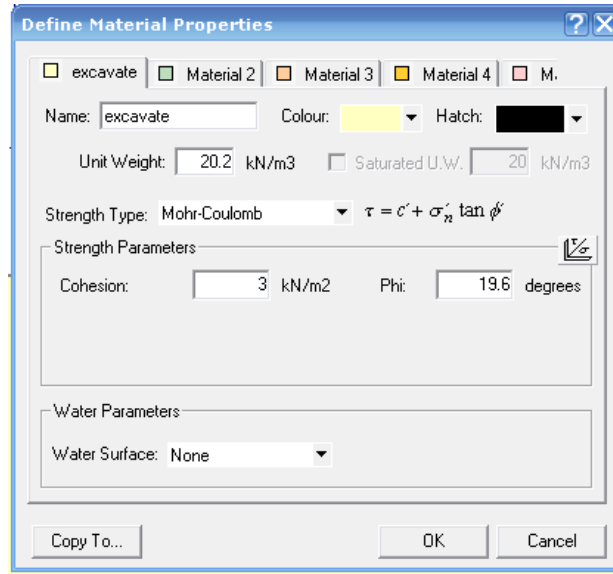
الشكل (5-24) طريقة توليد دوائر الانزلاق بالبحث الشبكي باستخدام حدود المنحدر وتزايد نصف القطر

العدد الكلي لدوائر الانزلاق المتولدة بالبحث الشبكي Grid Search = (تزايد نصف القطر + 1) \* (العدد الكلي لمراكز الانزلاق) وفي المنحدر المدروس هذا يساوي إلى  $11 \times 21 \times 21 = 4851$  دائرة انزلاق [13].

The total number of slip circles generated by a Grid Search, is therefore = (Radius Increment + 1) x (total # of grid slip centers)

#### 4-9-5 خواص المواد Properties

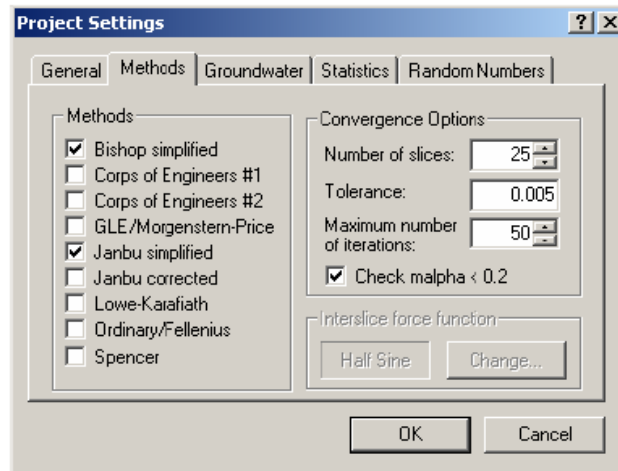
من خلال هذا الخيار يتم إدخال مواصفات تربة المنحدر المدروس من تماسك وزاوية احتكاك كما هو مبين بالشكل (25-5):



الشكل (25-5) خواص مواد المنحدر المدروس

#### 5-9-5 طرق التحليل Analysis Methods

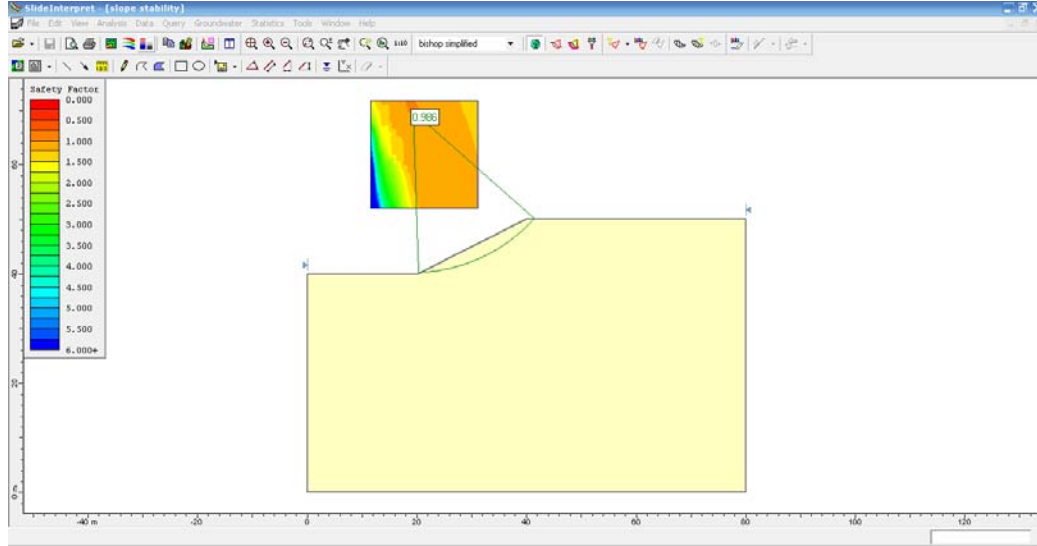
من خلال نافذة Project Settings وعن طريق خيار Methods يمكن تحديد طريقة تحليل المنحدر المدروس باستخدام واحدة أو أكثر من طرق التوازن الحدي LEM كما يسمح هذا الخيار بتحديد عدد الشرائح والتقارب كما هو مبين بالشكل (26-5):



الشكل (26-5) طرق التوازن الحدي باستخدام برنامج Slide

## 10-5 مرحلة اظهار النتائج

تبدأ هذه المرحلة باستخدام خيار Interpret وسيظهر المنحدر كما هو مبين بالشكل (27-5) حيث سيظهر المنحدر وما يسمى بـ سطح الانزلاق العام الأصغري



الشكل (27-5) المنحدر بعد التحليل باستخدام طريقة Bishop

Global Minimum Slip Surface: وهو سطح الانزلاق صاحب أصغر قيمة لعامل الأمان

.FOS

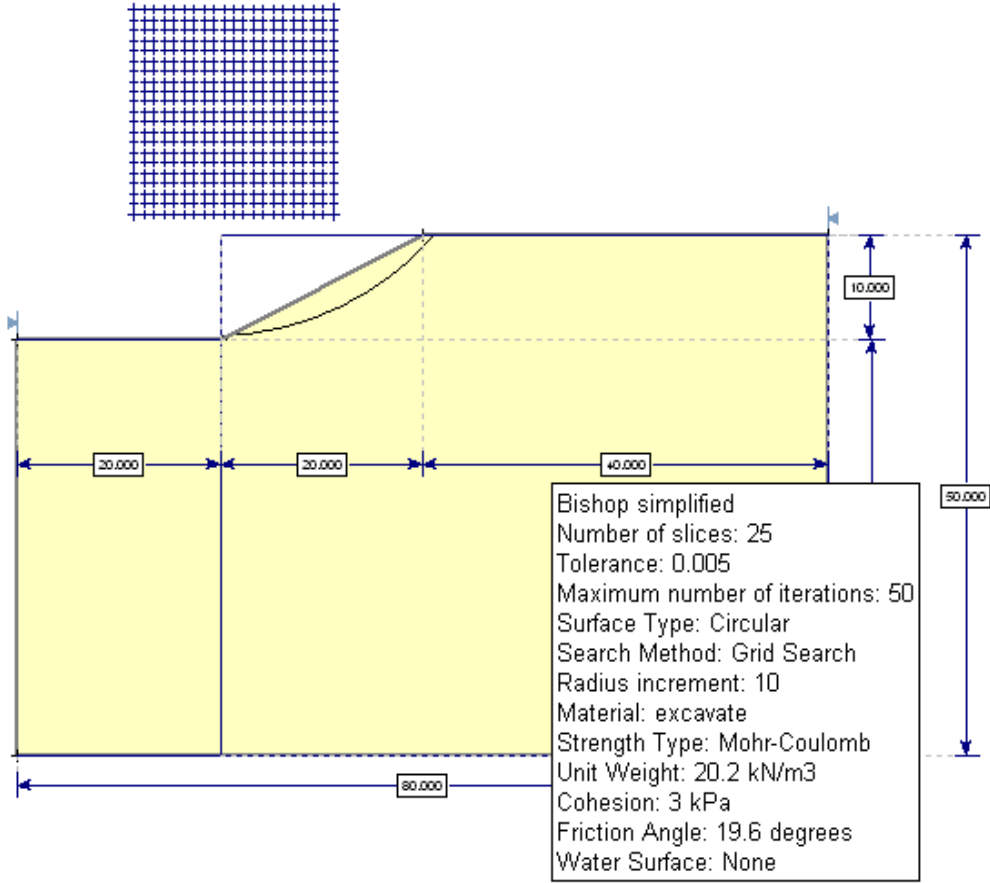
وتجدر الإشارة إلى أن سطح الانزلاق الأصغري ليس بالضرورة أن يكون هو سطح الانزلاق الأصغري المحتمل للمنحدر المدروس، فهو يعتمد على طرق وبارامترات البحث أي يمكن أن توجد سطوح انزلاق بقيمة أصغر لعامل الأمان (توضع الشبكة، مسافات التباعد، تزايد نصف القطر وحدود النموذج كل هذه العوامل من الممكن أن تؤثر على نتائج البحث الشبكي).

كما أن قيمة عامل الأمان الناتجة عن سطح الانزلاق الأصغري يمكن أن يختلف عند حسابه بأكثر من طريقة توازن حدي LEM وذلك تبعاً لفرضيات كل طريقة [13].



### 11-5 النموذج المدروس باستخدام برنامج Slide 5:

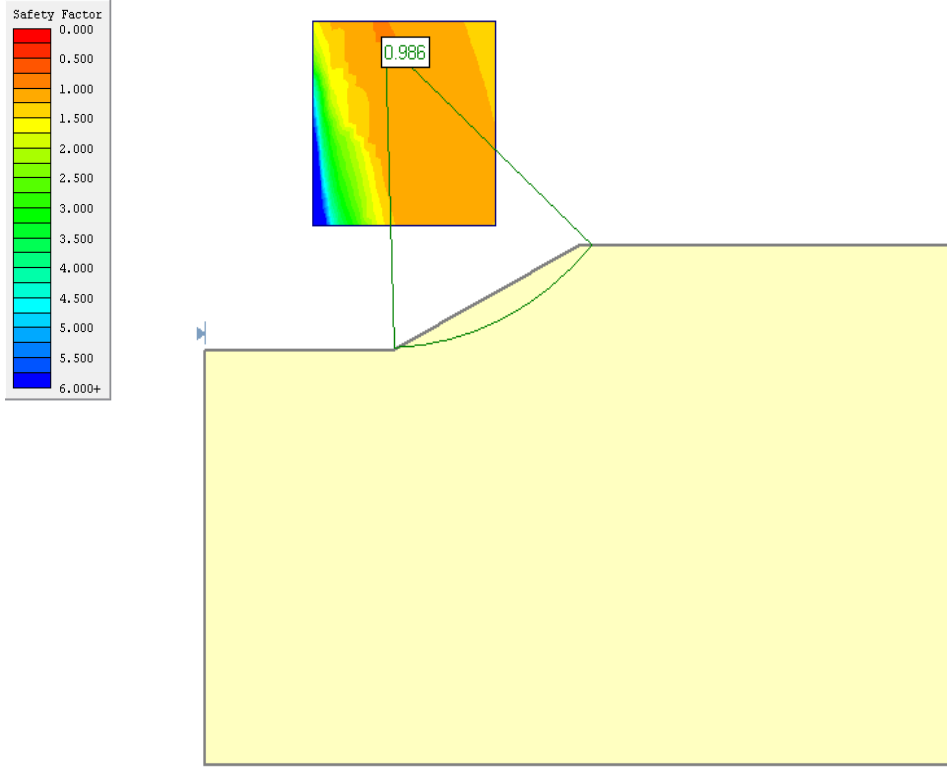
لقد تمت دراسة نفس النموذج السابق المدروس باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR وذلك ليصار إلى مقارنة نتائج كلا الطريقتين SSR وبالنسبة لطرق التوازن التقليدي LEM فقد تم اعتماد طريقة Bishop المبسطة لمقارنتها مع نتائج التحليل باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص. تمت دراسة المنحدر السابق باستخدام طريقة Bishop المبسطة والتي تفترض شكل دائري لسطح الانهيار حيث تم تقسيمه إلى 25 شريحة فكانت قيمة عامل الأمان = 0.986 وآلية انهيار المنحدر بالشكل (28-5):



الشكل (28-5) المنحدر المدروس باستخدام طريقة Bishop

باستخدام طريقة Bishop المبسطة كانت قيمة عامل الأمان = 0.986 وآلية انهيار المنحدر بالشكل

(29-5):



الشكل (29-5) المنحدر المدروس وعامل الأمان باستخدام طريقة Bishop المبسطة

نلاحظ أن قيم عامل الأمان باستخدام طريقة SSR للمنحدر المدروس كانت  $FOS=1.04$  وباستخدام واحدة من طرق التوازي الحدي LEM وهي طريقة Bishop كانت قيمة عامل الأمان  $FOS=0.986$  وهي قيمة لا تختلف بشكل كبير عن القيمة الناتجة من تحليل SSR حيث أن الفارق النسبي هو 5.19% وهو فارق بسيط.

بعد التأكد من عدم وجود ذلك الاختلاف الكبير بين طريقة تخفيض مقاومة القص SSR وطريقة Bishop المبسطة بالنسبة لمنحدر متجانس ستتم دراسة المنحدر السابق من ناحيتين :

#### 12-5 أولاً : دراسة المنحدر من الناحية التصميمية:

ولتحقيق هذه الغاية تم تغيير النسبة  $(\beta=H/L)$  أو ميل المنحدر لمعرفة مدى تأثير تغيير النسبة السابقة على عامل الأمان وذلك باستخدام طريقة SSR ومقارنة النتائج مع نتائج طريقة Bishop.

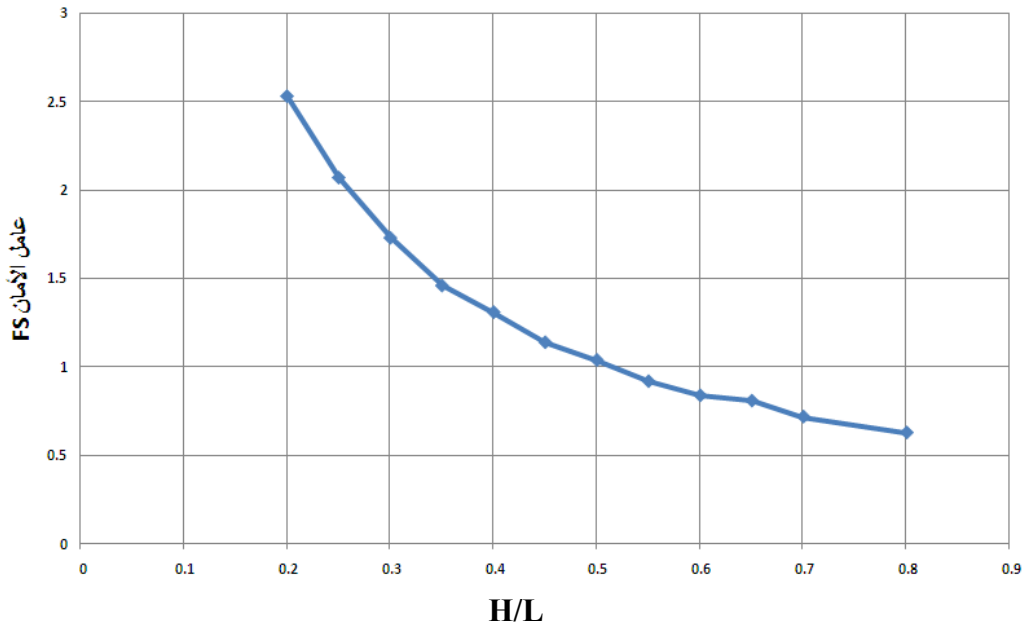
حيث تم تغيير النسبة  $\beta=H/L$  حسب القيم التالية :

$\beta= H/L$	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.60	0.65	0.7	0.8
--------------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	------	------	-----	-----

وكانت نتائج التحليل باستخدام طريقة SSR كالتالي :

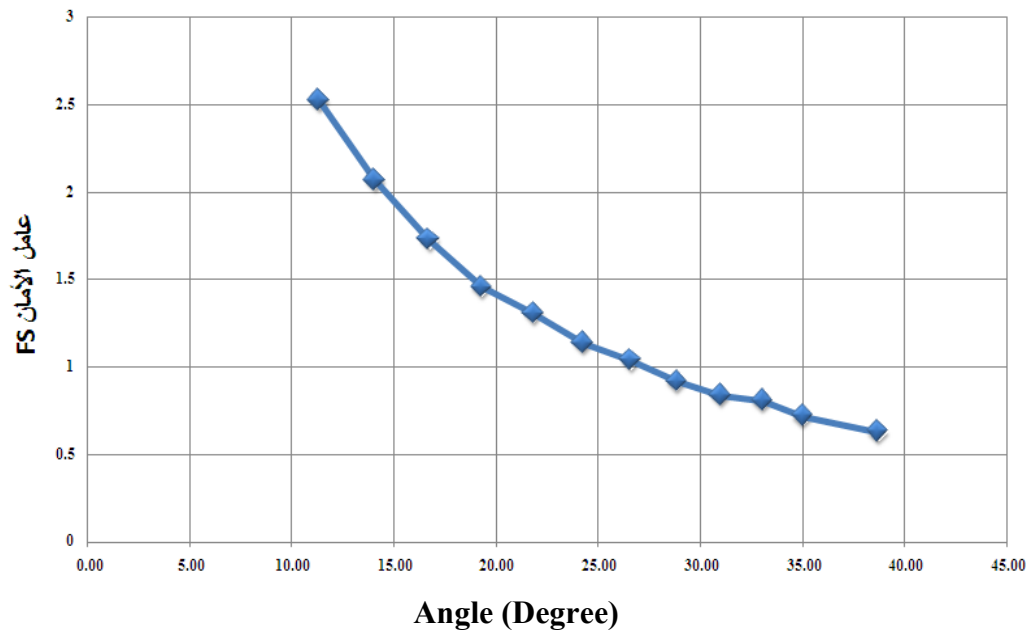
H/L	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.60	0.65	0.7	0.8
FS SSR	2.53	2.07	1.73	1.46	1.31	1.14	1.04	0.92	0.84	0.81	0.72	0.63

ويمكن رسم العلاقة بين تغيير النسبة H/L وعامل الأمان كما يلي:



الشكل (30-5) تغير ميل المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة

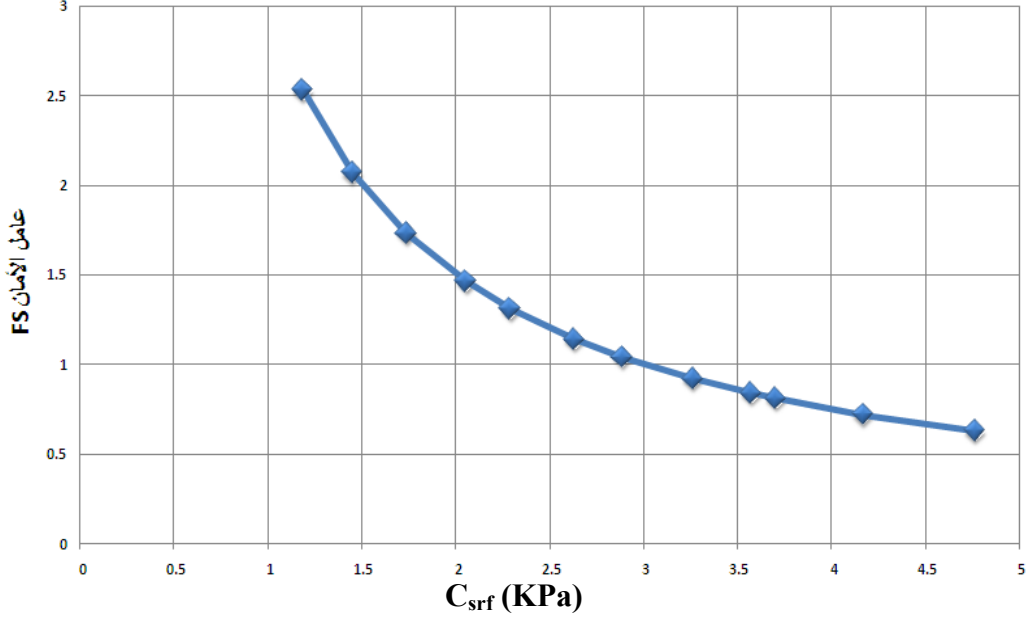
كما يمكن رسم العلاقة بين زاوية المنحدر وعامل الأمان:



الشكل (31-5) تغير زاوية المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة

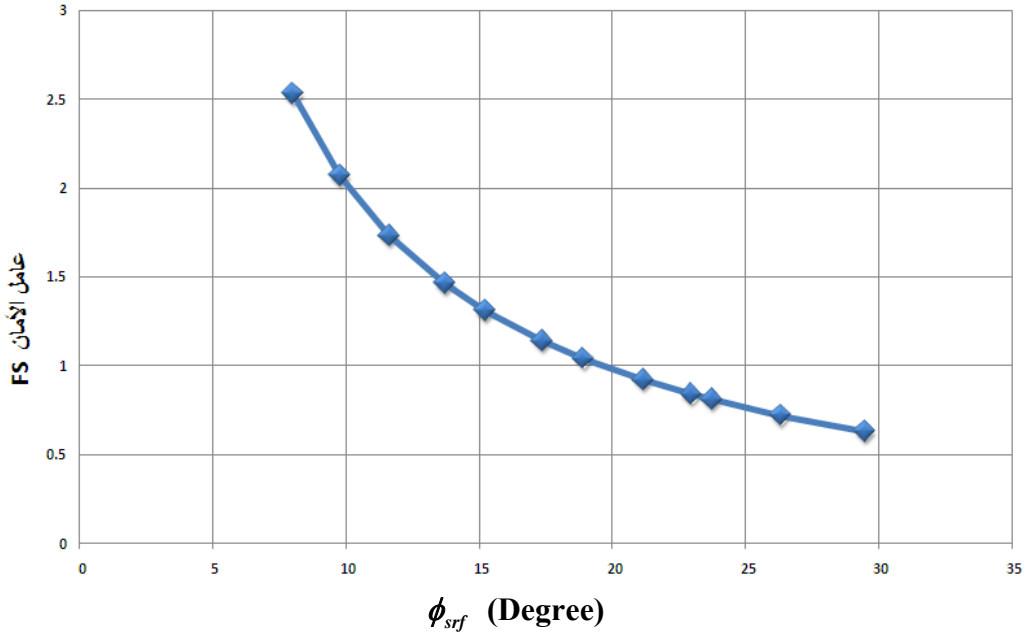
وقد تم رسم العلاقة بين عامل الأمان وقيمة تماسك تربة المنحدر عند الانهيار فكان المخطط التالي

الشكل (32-5):



الشكل (5-32) قيم تغير قيمة تماسك تربة المنحدر بتغير النسبة H/L

وكذلك الأمر بالنسبة لتماسك تربة المنحدر:



الشكل (5-33) قيم تغير قيمة زاوية احتكاك تربة المنحدر بتغير النسبة H/L

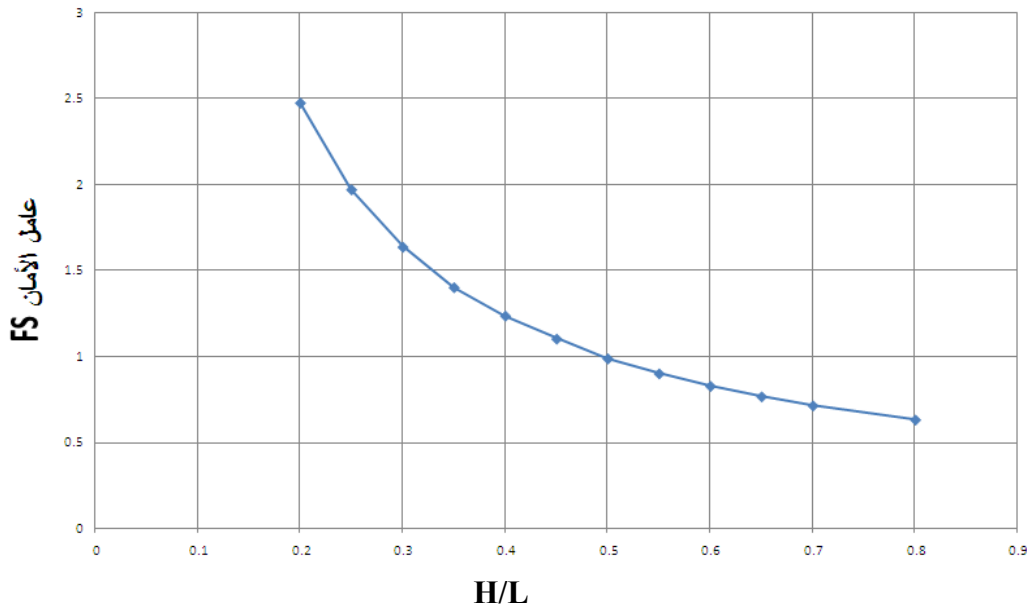
وبالتالي يمكن القول انه كلما ازداد ميل المنحدر H/L تناقصت قيمة عامل الأمان للمنحدر المدروس وهذا التناقص في قيمة عامل الأمان يؤدي إلى تزايد في قيمة كل من التماسك  $c_{srf}$  وزاوية احتكاك المنحدر  $\phi_{srf}$  عند الانهيار، بمعنى آخر يمكن القول إن المنحدر يوظف كل متحولاته الميكانيكية من تماسك واحتكاك عند زيادة النسبة H/L، وهذا أمر منطقي لأن الزيادة في تغير ميل المنحدر تؤدي إلى تناقص في قيمة عامل الأمان هذا التناقص الذي ينعكس ايجابياً بالزيادة في قيمة كل من التماسك والاحتكاك عند الانهيار بحسب العلاقة العكسية بين التماسك والاحتكاك عند الانهيار وعامل الأمان.

تمت دراسة تغير النسبة السابقة لميل المنحدر H/L باستخدام طريقة Bishop المبسطة وكانت

النتائج كما يلي:

H/L	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.60	0.65	0.7	0.8
FS bishop	2.473	1.969	1.635	1.4	1.234	1.101	0.986	0.899	0.826	0.765	0.713	0.63

وكانت المخططات كما يلي:



الشكل (5-34) تغير النسبة H/L وعامل الأمان باستخدام طريقة Bishop

تمت مقارنة النتائج بتغيير النسبة H/L التي حصلنا عليها باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص

مع SSR مع النتائج التي حصلنا عليها باستخدام طريقة Bishop المبسطة :

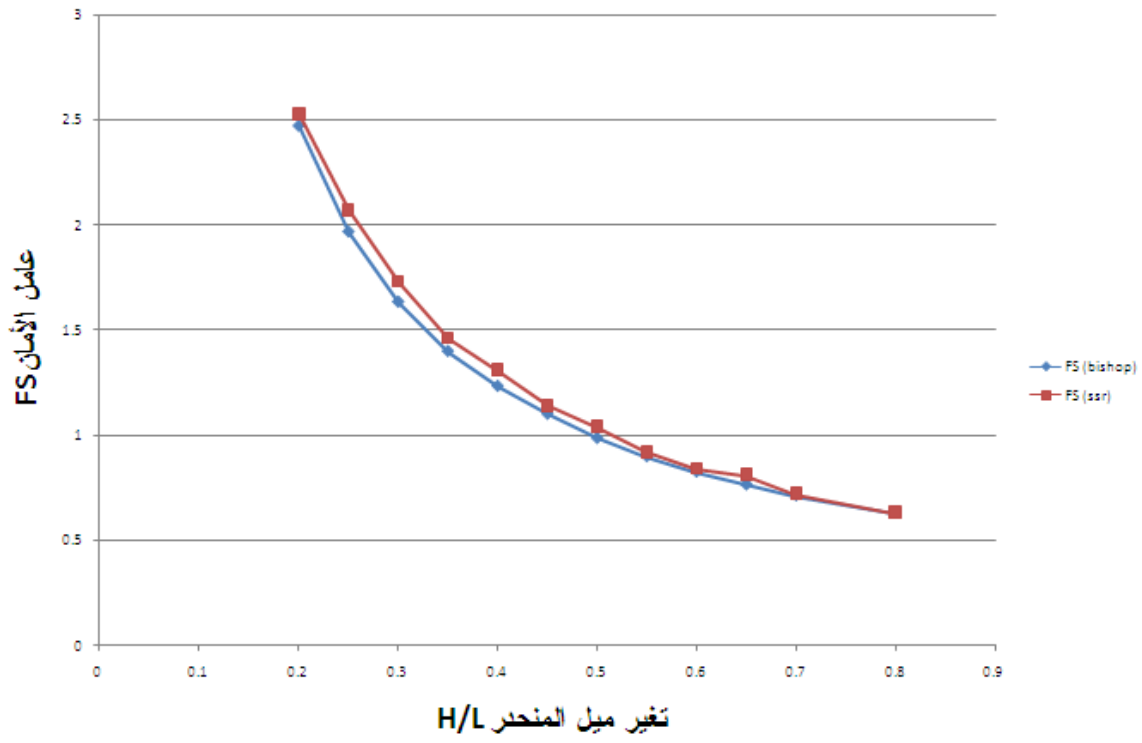
H/L	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.60	0.65	0.7	0.8
FS SSR	2.53	2.07	1.73	1.46	1.31	1.14	1.04	0.92	0.84	0.81	0.72	0.63
FS bishop	2.473	1.969	1.635	1.4	1.234	1.101	0.986	0.899	0.826	0.765	0.713	0.63
الفارق النسبي %	2.25	4.88	5.49	4.11	5.80	3.42	5.19	2.28	1.67	5.56	0.97	0.00

من خلال الجدول السابق نلاحظ أن القيم المحسوبة لعامل الأمان FOS باستخدام طريقة تخفيض

مقاومة القص SSR وطريقة Bishop المبسطة لا تختلف كثيراً حيث أن الفارق النسبي بين الطريقتين لم

تزيد قيمته عن 5.8% علماً أن لكل طريقة افتراضاتها الخاصة بتحديد عامل الأمان، ويمكن رسم هذه

النتائج كما هو مبين:



الشكل (5-35) الفرق بين طريقتي Bishop و SSR في حساب عامل الأمان عند تغير النسبة H/L

### 13-5 ثانياً: دراسة المنحدر من الناحية الميكانيكية:

ولتحقيق هذه الغاية تم دراسة المتغيرات الميكانيكية لتربة المنحدر المتجانس السابق من خلال تغيير قيمة عامل واحد من العوامل الأربعة والداخلية بشكل مباشر في حساب عامل الأمان باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR.

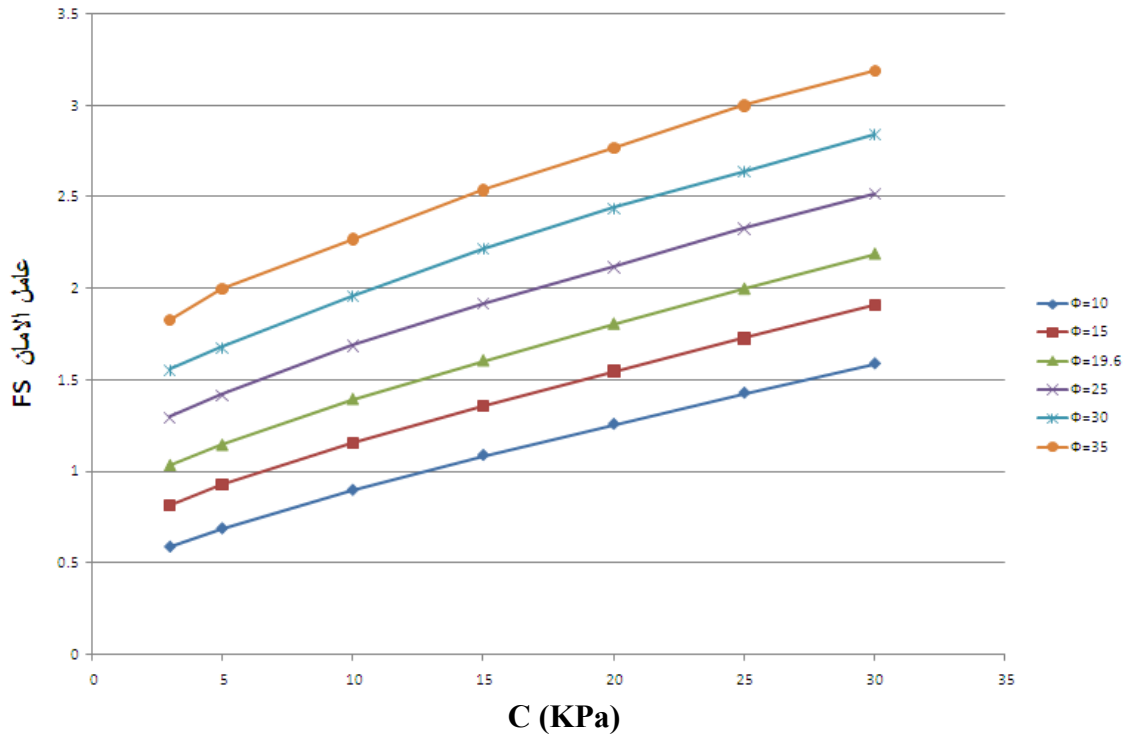
1- تغيير قيمة التماسك: حيث كانت قيم التماسك كما يلي:

C (KPa)	3	5	10	15	20	25	30
---------	---	---	----	----	----	----	----

وقد كانت النتائج كما يلي:

دراسة تأثير تغير تماسك تربة المنحدر C على عامل الأمان FS						
$\Phi$ (Degree)	$\Phi=10$	$\Phi=15$	$\Phi=19.6$	$\Phi=25$	$\Phi=30$	$\Phi=35$
C (KPa)	FS	FS	FS	FS	FS	FS
3	0.59	0.82	1.04	1.3	1.56	1.83
5	0.69	0.93	1.15	1.42	1.68	2
10	0.9	1.16	1.4	1.69	1.96	2.27
15	1.09	1.36	1.61	1.92	2.22	2.54
20	1.26	1.55	1.81	2.12	2.44	2.77
25	1.43	1.73	2	2.33	2.64	3
30	1.59	1.91	2.19	2.52	2.84	3.19

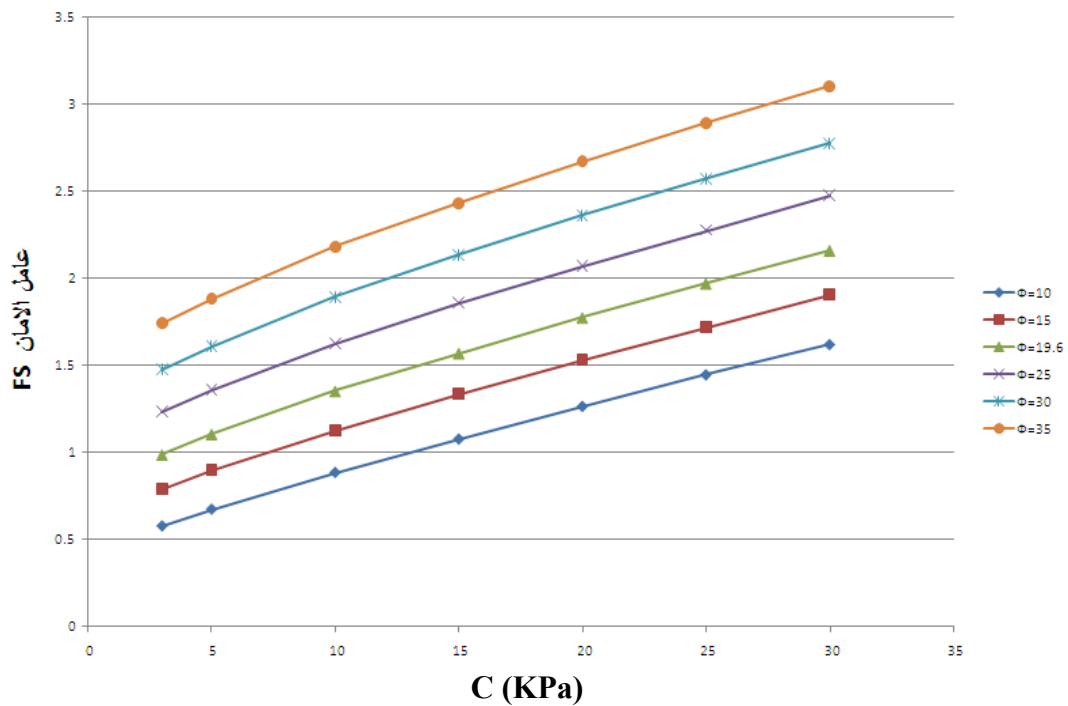
وقد تم تمثيل هذه القيم كما يلي:



الشكل (5-36) تغير تماسك تربة المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة لها

من الجدول السابق والمخطط نلاحظ تزايد قيمة عامل الأمان FOS كلما زادت قيمة تماسك تربة المنحدر المتجانس.

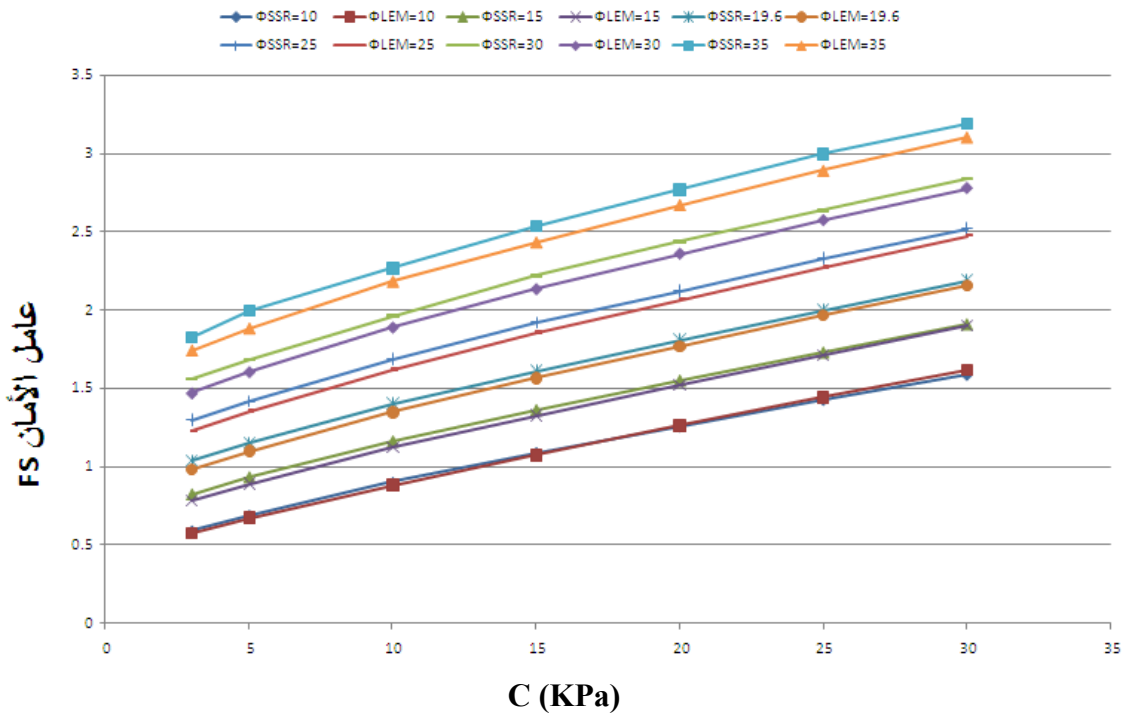
وقد تمت مقارنة هذه النتائج مع نتائج طريقة Bishop المبسطة وعند نفس القيم المتغيرة للتماسك فكانت قيم عامل الأمان الناتجة ممثلة بالشكل:



الشكل (5-37) تغير قيم تماسك تربة المنحدر المدروس وقيم عامل الأمان باستخدام طريقة Bishop



وحتى يتم تبيان الفارق بين طريقة تخفيض مقاومة القص SSR وطريقة Bishop المبسطة والتي تندرج بين طرق التوازن التقليدي LEM يمكن رسم المخطط التالي:



الشكل (5-38) قيم عامل الأمان باستخدام طريقتي SSR و Bishop عند تغير قيم تماسك تربة المنحدر

2- تغيير زاوية الاحتكاك  $\phi$  للمنحدر المدروس بحسب الجدول التالي:

$\phi$ (Degree)	10	15	19.6	25	30	35
-----------------	----	----	------	----	----	----

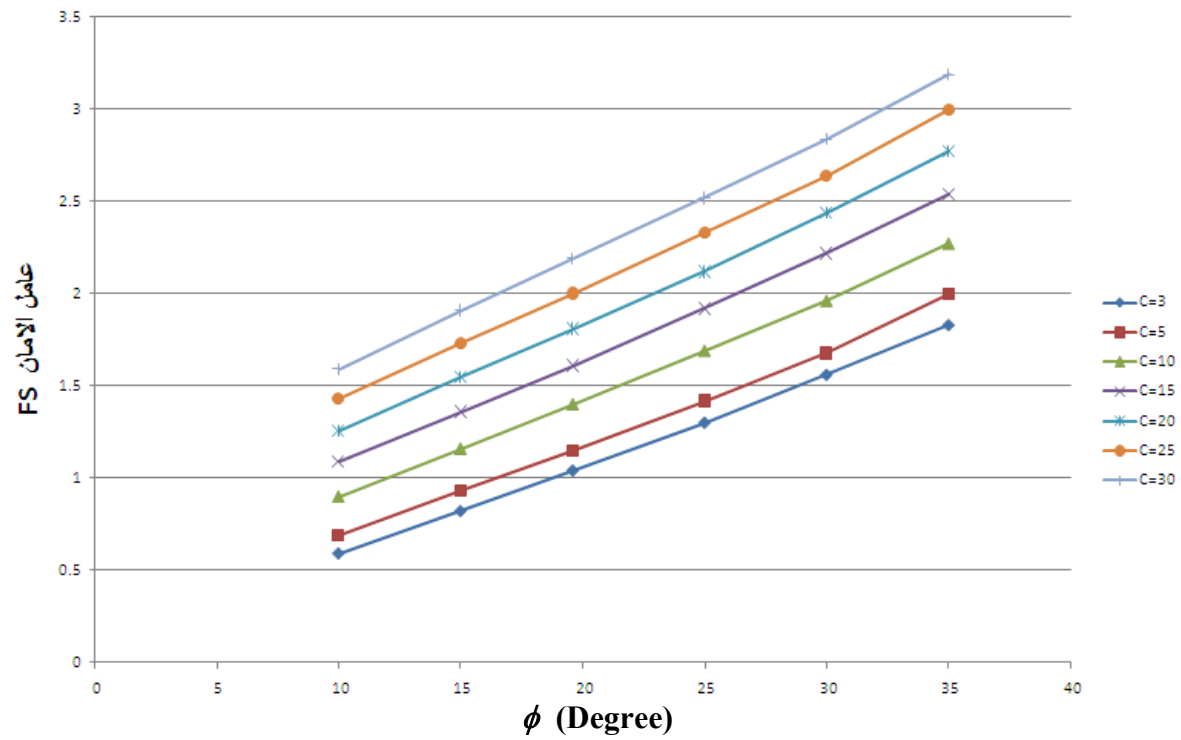
أما النتائج فكانت كما يلي:

دراسة تأثير تغير زاوية الاحتكاك $\Phi$ لتربة المنحدر على عامل الأمان FS							
C	C=3	C=5	C=10	C=15	C=20	C=25	C=30
$\Phi$	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
10	0.59	0.69	0.9	1.09	1.26	1.43	1.59
15	0.82	0.93	1.16	1.36	1.55	1.73	1.91
19.6	1.04	1.15	1.4	1.61	1.81	2	2.19
25	1.3	1.42	1.69	1.92	2.12	2.33	2.52
30	1.56	1.68	1.96	2.22	2.44	2.64	2.84
35	1.83	2	2.27	2.54	2.77	3	3.19

ويمكن تمثيل النتائج كما يلي:

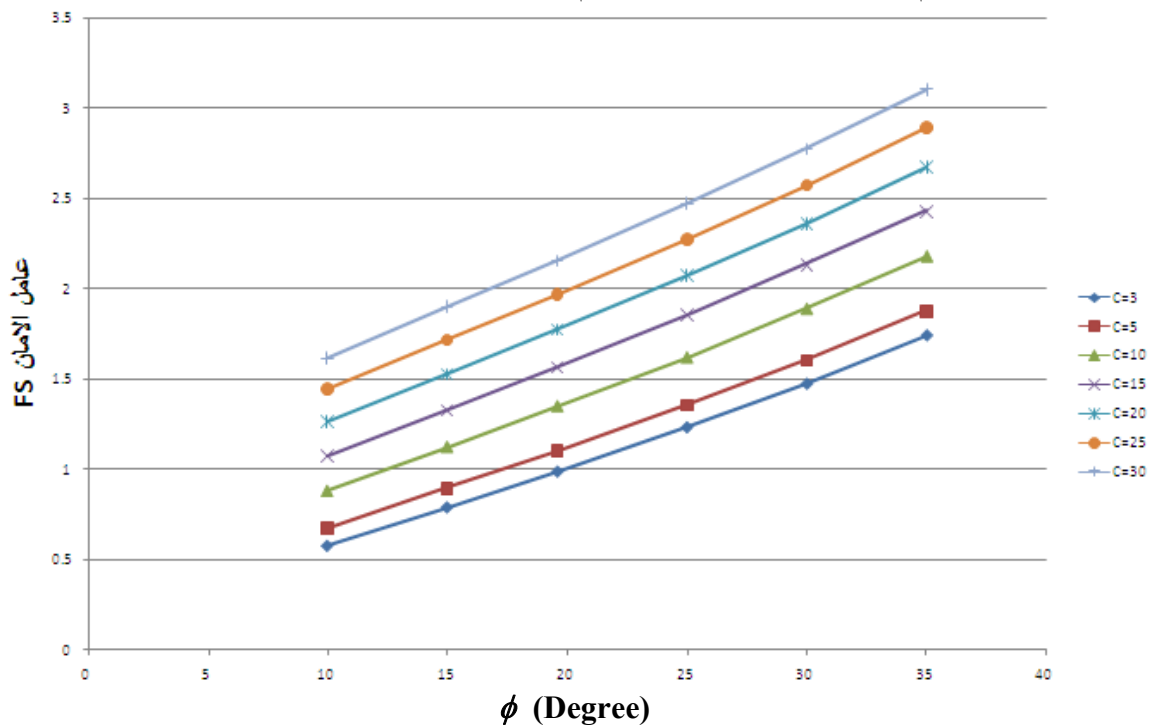
نلاحظ تزايد قيمة عامل الأمان FOS كلما تحسنت مواصفات المنحدر من الناحية الميكانيكية.

وقد تمت مقارنة النتائج السابقة والنتيجة باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص مع نفس القيم لزاوية



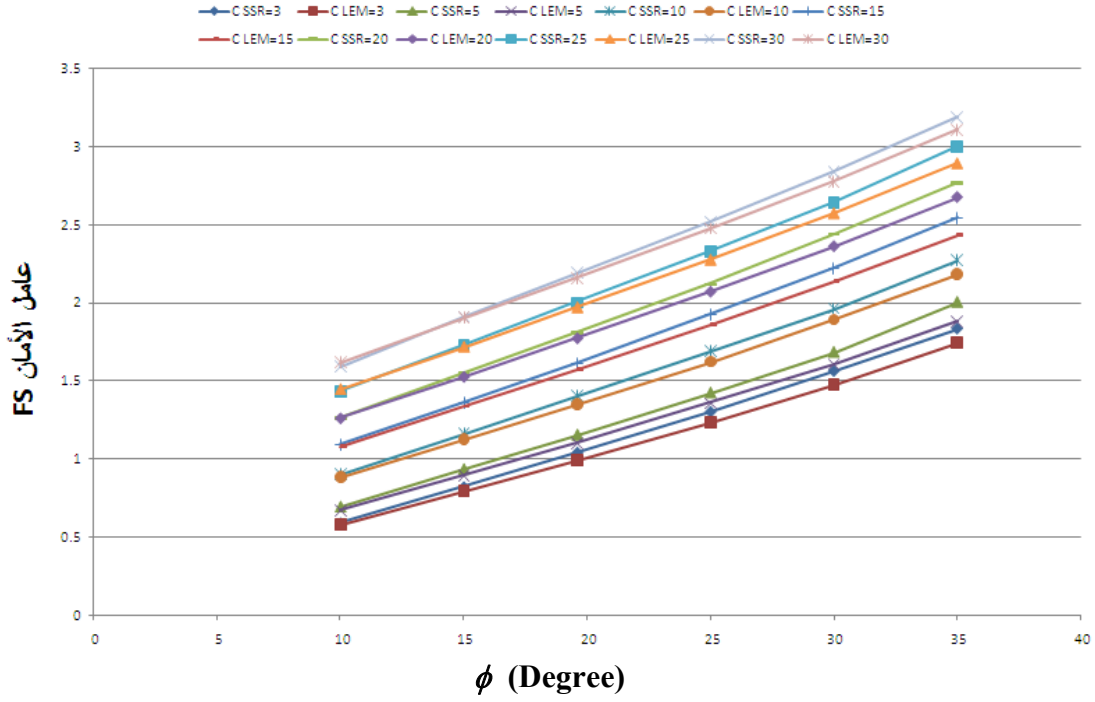
الشكل (5-39) تغير قيم زاوية الاحتكاك وعامل الأمان الموافق

الاحتكاك وقيم عامل الأمان الناتجة عن استخدام طريق Bishop المبسطة كما هو مبين بالشكل:



الشكل (5-40) تغير قيم زاوية الاحتكاك للمنحدر وعامل الأمان الموافق باستخدام طريقة Bishop

ويمكن ملاحظة نتائج الطريقتين SSR و Bishop من خلال المخطط التالي:



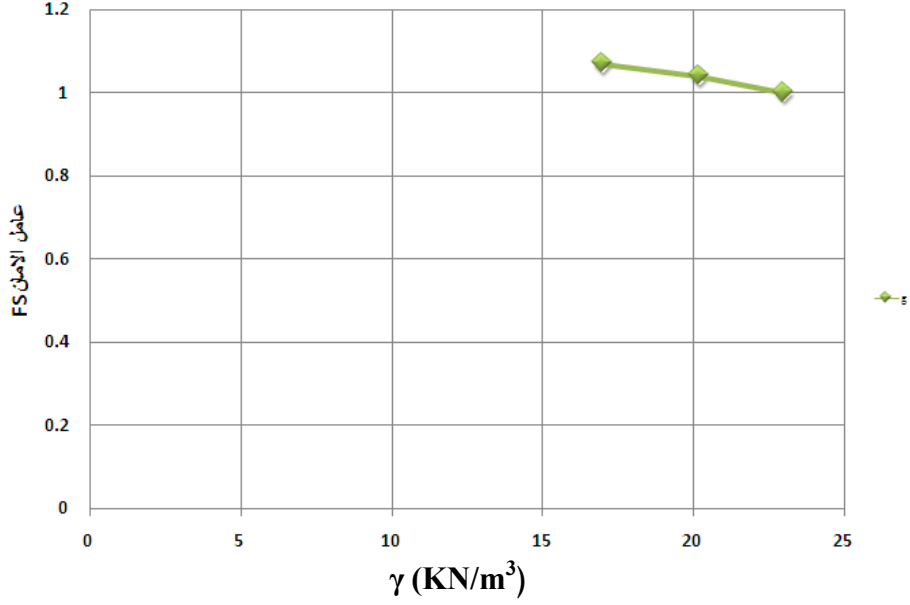
الشكل (41-5) قيم عامل الأمان باستخدام طريقتي Bishop و SSR عند تغير قيم زاوية احتكاك تربة المنحدر  
 3- تغيير قيمة كثافة تربة المنحدر: وذلك مع بقاء كل القيم الميكانيكية الأخرى للمنحدر المدروس  
 ثابتة من تماسك واحتكاك وذلك وفق الجدول التالي:

$\gamma$ ( $KN/m^3$ )	17	20.2	23

قيم عامل الأمان الموافقة لقيم الكثافة كما يلي:

$\gamma$ ( $KN/m^3$ )	17	20.2	23
FS	1.07	1.04	1

من الجدول السابق نلاحظ أنه كلما ازدادت كثافة التربة كلما تناقصت قيمة عامل الأمان ويمكن تمثيل النتائج السابقة كما هو مبين بالشكل (42-5)، فمن الممكن أنه كلما زاد وزن التربة قلت قيمة عامل الأمان، أو أن يكون هذا التأثير بسبب القيم الصغيرة للتماسك و الاحتكاك إذ يمكن أن يكون هنالك تداخل في تأثير كل من الاحتكاك و التماسك على عامل الأمان أو و هذا ما سيتم تحديده باستخدام طريقة إحصائية تبين تأثير كل عامل على حدى من العوامل المؤثرة على عامل الأمان و مدى التداخل بين تلك العوامل.



الشكل (42-5) تغير قيم كثافة المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة

4- تغيير قيم عامل بواسون: وذلك وفق الجدول التالي :

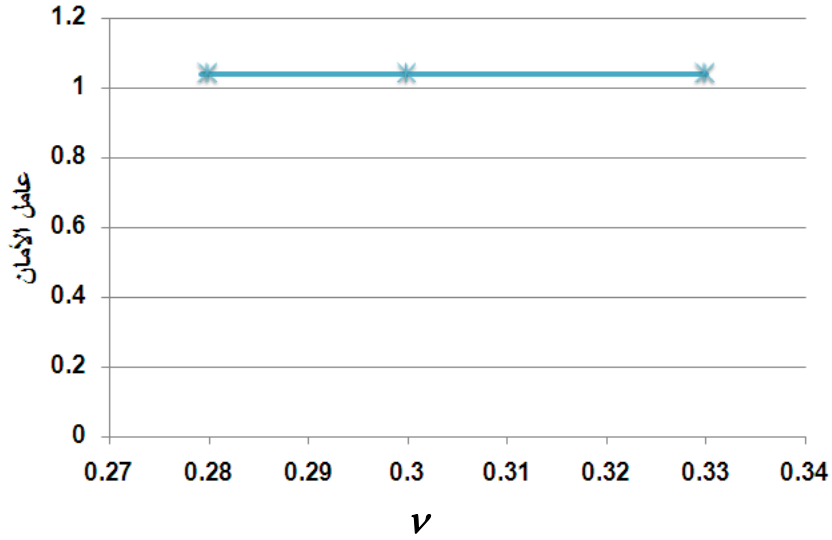
$\nu$	0.28	0.3	0.33
-------	------	-----	------

النتائج كانت كما يلي:

$\nu$	0.28	0.3	0.33
FS	1.04	1.04	1.04

من القيم السابقة نلاحظ عدم وجود أي تأثير لتغير قيمة معامل بواسون على قيمة عامل أمان المنحدر المدروس وهذا ما تؤكد عليه المراجع والتي تؤكد على تأثير عامل بواسون قبل الانهيار.

ويمكن تمثيل القيم السابقة بالشكل:



الشكل (43-5) تغير قيمة عامل بواسون وقيم عامل الأمان

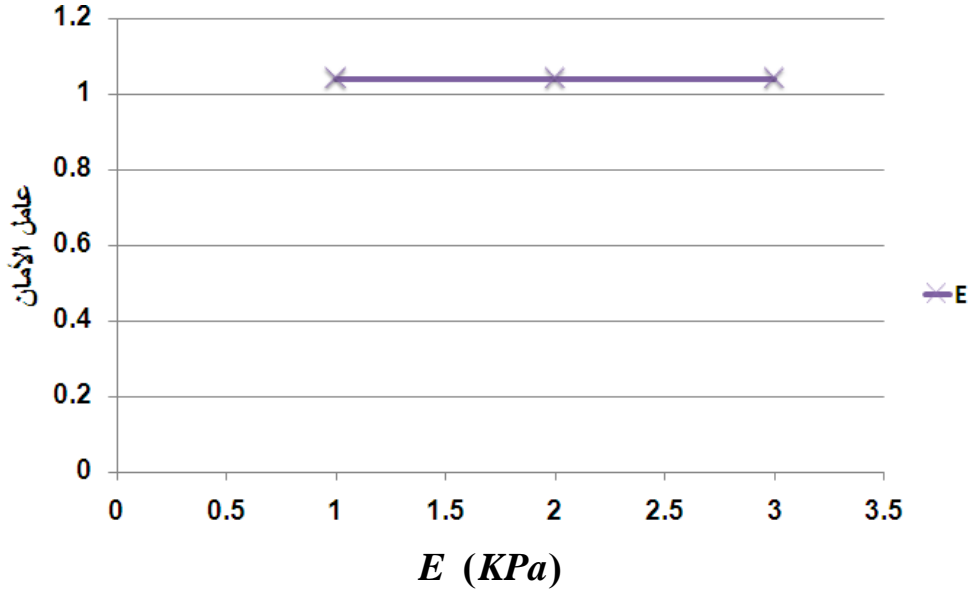
5- تغيير قيمة عامل المرونة: وقد كانت قيم عامل المرونة كما يلي:

$E$ (KPa)	50000	100000	300000
-----------	-------	--------	--------

وقيم عامل الأمان الموافقة والمحسوبة باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR:

$E$ (KPa)	50000	100000	300000
FS	1.04	1.04	1.04

وهي تدل على عدم وجود تأثير لتغير عامل المرونة على عامل الأمان، والمخطط كما يلي:



الشكل (44-5) عامل المرونة للمنحدر المدروس وقيم عامل الأمان

مما سبق وبعد دراسة العوامل الخمسة المؤثرة على المنحدر من: تماسك وزاوية احتكاك وكثافة نجد بأن هذه العوامل تؤثر بشكل مباشر على قيمة عامل الأمان للمنحدر المتجانس المدروس، أما بالنسبة للعاملين المتبقين من عامل بواسون وعامل المرونة لا تؤثر على قيمة عامل الأمان وذلك باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR.

## الفصل السادس

### تقييم النتائج باستخدام طريقة المخططات التجريبية الكاملة وتقنية تخفيض

#### مقاومة القص للمنحدرات المتجانسة

### Full Experiment Plans with Shear Strength Reduction for Homogenise Slopes

#### 1-6 مقدمة:

في الفصل السابق تم ملاحظة أن تغيير قيمة متغير واحد من متغيرات المنحدر الهندسية او الميكانيكية يأخذ وقتاً طويلاً كما أن تأثير هذه العوامل على عامل الأمان قد يختلف بتغيير العامل الآخر كما في دراسة تأثير التماسك و الاحتكاك و ملاحظة أن ازدياد في قيمة الاحتكاك مع بقاء تلك القيمة و زيادة قيم التماسك قد حسن من قيمة عامل الأمان، بينما وجد أن الكثافة قد لا تتبع نفس الأسلوب لذلك كان التفكير في طريقة إحصائية تغير قيم المتغيرات المؤثرة على عامل الأمان، و بما أن التفكير الإحصائي والطرق الإحصائية يلعبان دوراً هاماً في التخطيط وإجراء وتحليل وترجمة النتائج الهندسية، ولذلك فإن أفضل إستراتيجية لدراسة تأثير عدة عوامل على خاصية معينة للحالة المدروسة هي استخدام طريقة التصميم التجريبي (DOE) Design of Experiments والتي تعتبر كواحدة من أهم الطرق الإحصائية الموثوقة وتعطي استنتاجات عملية واقتصادية، [14] فهي طريقة تعتمد على العوامل والاستجابات وتحديد أي عامل من عوامل التصميم يؤثر في الاستجابة أكثر من غيره، [15].

#### 2-6 مبدأ طريقة التصميم التجريبي (DOE):

مبدأ طريقة التصميم التجريبي (DOE) يتطلب من المهندس أن يقوم بتغيير قيم عوامل (متغيرات) التصميم وبشكل متعمد ومن خلال تغيير قيم عوامل التصميم يستطيع فهم كيفية تغير النتائج (الاستجابة) تبعاً لتغير عوامل التصميم إلا أنه يجب ملاحظة أن عوامل التصميم لا يمكن أن تؤثر بنفس الأسلوب على الحالة المدروسة فبعض العوامل يمكن أن تؤثر بشكل كبير على النتائج وبعضها بشكل متوسط والبعض الآخر قد لا يؤثر مطلقاً على الحالة المدروسة، لذلك فإن الهدف من تصميم التجارب المخطط له بدقة هو فهم أي مجموعة من العوامل (المتغيرات) Set of Variables (الملحق 5-A) تؤثر على الاستجابة Response، ومن ثم تحديد أفضل مستويات للعوامل Variables Levels المدروسة للحصول على أفضل أداء للاستجابة [14].

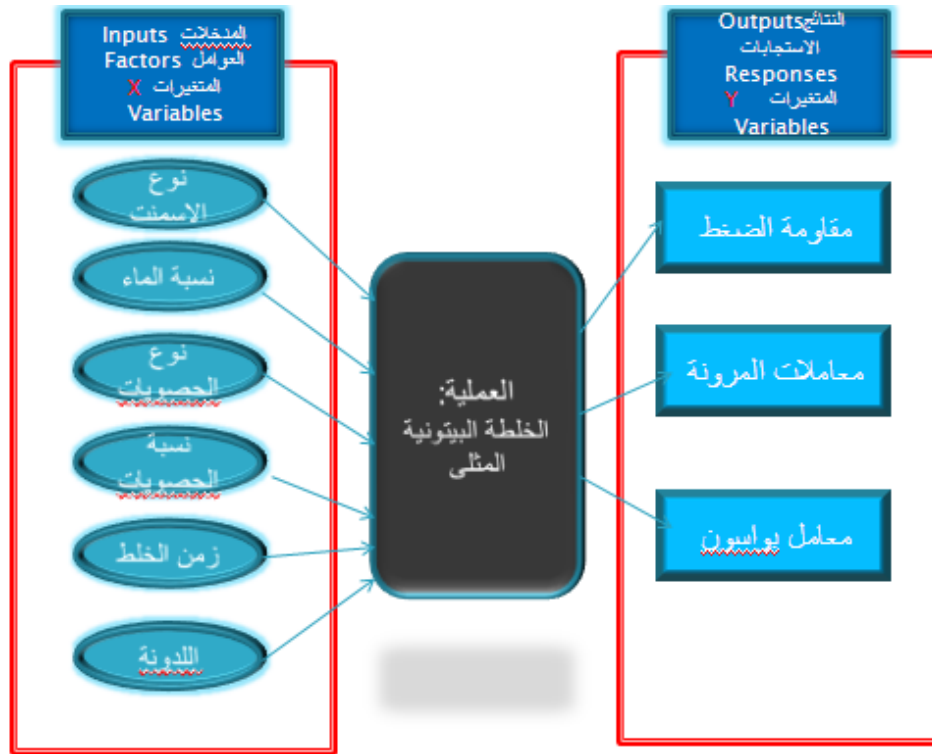
كما تجدر الإشارة إلى أنه من المهم اعتبار كل المتغيرات ذات العلاقة (حتى تلك المتغيرات التي تبدو غير ضرورية) وذلك قبل التصديق على خطة جمع البيانات النهائية Data Collection Plan وذلك لزيادة الثقة في النتائج النهائية [19].

#### 3-6 تطبيقات التصميم التجريبي DOE في التصميم الهندسي:

تعتبر طريقة التصميم التجريبي DOE منهجية منظمة لتطبيق الإحصائيات على التجارب، فهي تسمح للمهندسين بتطوير نموذج رياضي يسمح لهم بتوقع كيفية تداخل (Interact) المتغيرات الداخلية

(input variables) مع بعضها لتخلق متغيرات ناتجة (output variables) أو استجابات للعملية أو الظاهرة المدروسة، حيث أن استخدام طريقة التصميم التجريبي DOE يمكن أن يتم على نطاق واسع ويشمل تقريباً كافة المجالات الهندسية، وبالتالي يمكن القول إن إجراء التجارب في المجال الهندسي يتم لعدة أسباب، [16]:

- 1- تقييم ومقارنة مكونات التصميم الرئيسية.
  - 2- تقييم المواد المختلفة.
  - 3- اختيار بارامترات التصميم وبالتالي سيعمل النظام بشكل جيد من أجل عدة أنواع من حالات التصميم (تصميم متين Robust Design).
  - 4- تحديد بارامترات التصميم الرئيسية والتي تؤثر على الأداء.
- إن طريقة التصميم التجريبي يمكن أن تطبق على عدة مجالات من الحياة اليومية وكمثال على ذلك: أثناء إرسال رسالة بريدية فإن العوامل المؤثرة هي: الطابع، رمز المنطقة، اليوم الذي تم إرسال البريد الاستجابة: هي عدد الأيام اللازمة لوصول البريد.
- مثال آخر يمكن من خلاله توضيح العلاقة بين العوامل (المتغيرات) والاستجابة وذلك للحصول على مواصفات الخلطة البيتونية المثلى، الشكل (1-6):



الشكل (1-6) العوامل المؤثرة على الخلطة البيتونية

#### 4-6 استخدام طريقة التصميم التجريبي في دراسة استقرار المنحدرات:

إن تحليل استقرار المنحدرات يعتبر واحداً من أهم المسائل الجيوتكنيكية، وبما أن إستراتيجية تغيير عامل واحد One Factor at A Time OFAT قد تعطي بعض المؤشرات عن أن بعض العوامل

الداخلة في حساب استقرار المنحدر قد تؤثر بشكل أكبر على قيمة عامل الأمان، فقد تم تقسيم العوامل التي تؤثر على عامل الأمان إلى:

عوامل ميكانيكية وهي: تماسك التربة  $C$ ، وزاوية الاحتكاك  $\phi$ ، وكثافة التربة المدروسة  $\gamma$ ، وعامل المرونة  $E$ ، وعامل بواسون  $\nu$

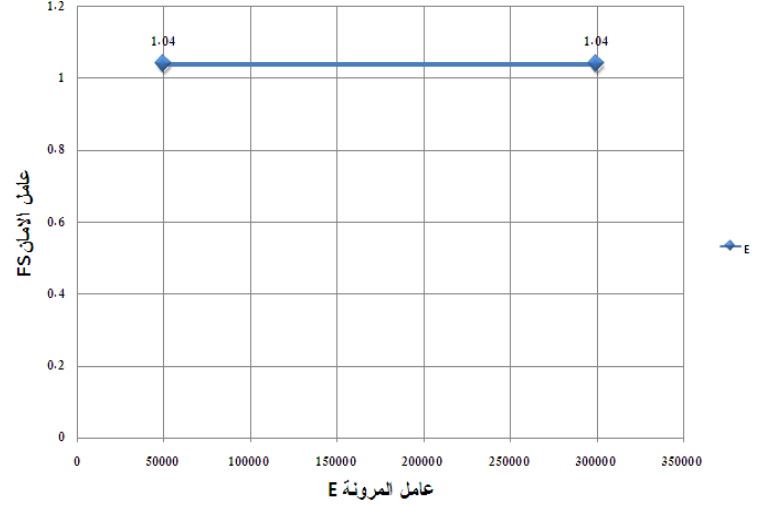
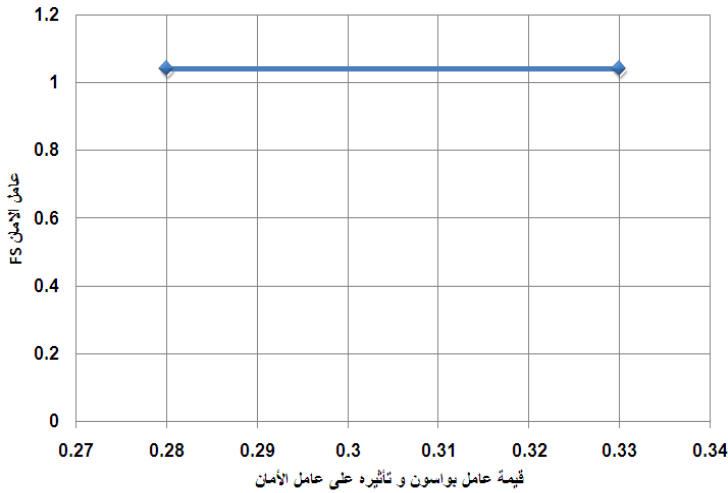
وعوامل جيومترية تتمثل في تغير ميل المنحدر  $\beta$  (النسبة  $H/L$ )

تم تحليل استقرار المنحدر المدروس باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص  $SSR$  حيث تم استخدام برنامج  $Phase^2$ ، مواصفات المنحدر المدروس مبينة بالشكل (6-11)، (6-12)

المخططات التالية تبين تغير كل من العوامل الميكانيكية للمنحدر والجيومترية على أساس تغير العامل المراد حساب عامل الأمان عنده مع بقاء بقية العوامل الأخرى ثابتة:

- العامل الأول هو عامل مرونة المنحدر  $E$  وكانت القيم المدروسة هي  $(50000, 300000)$  KPa من المخطط يلاحظ أن تغير قيمة عامل مرونة التربة لا يؤثر على قيمة عامل الأمان.

E (KPa)	Fs
50000	1.04
300000	1.04



الشكل (6-2) القيم المتغيرة لكل من عامل المرونة  $E$  عامل بواسون وقيمة عامل الأمان الموافقة

- العامل الثاني هو عامل بواسون  $\nu$  حيث أن القيم المدروسة كانت  $(0.28 - 0.33)$ ، و يلاحظ أيضاً عدم تأثير عامل بواسون على قيمة عامل الأمان.

$\nu$	Fs
0.28	1.04
0.33	1.04

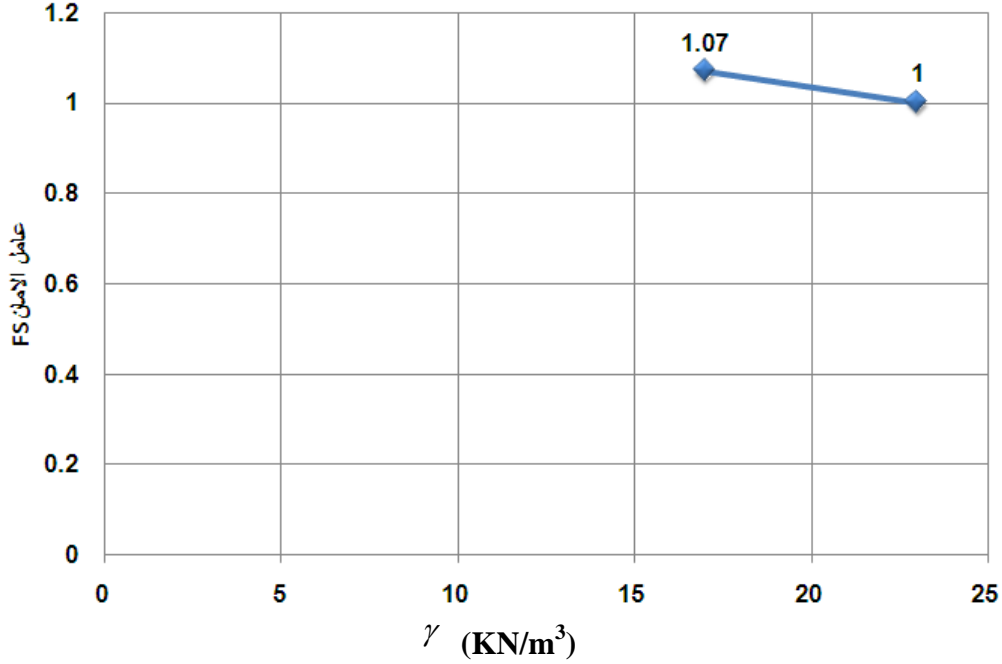


- العامل الثالث هو كثافة تربة المنحدر حيث كانت قيم الكثافة  $\text{KN/m}^3$  (17-23) وكانت النتائج

كما يلي:

$\gamma$ ( $\text{KN/m}^3$ )	Fs
17	1.07
23	1

من المخطط يمكن ملاحظة أن الزيادة في كثافة التربة تقلل من قيمة عامل الأمان.



الشكل (3-6) قيم كثافة التربة المتغيرة وقيم عامل الأمان الموافقة

- العامل الرابع هو تماسك تربة المنحدر  $C$  (10-25)KPa مع ثبات كافة العوامل الأخرى فكانت

قيم عامل الأمان كالتالي:

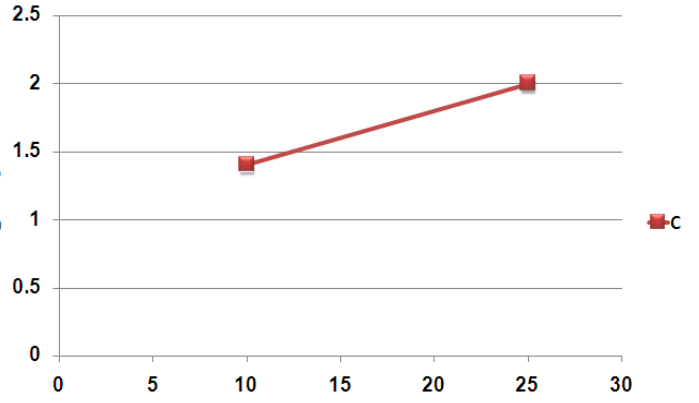
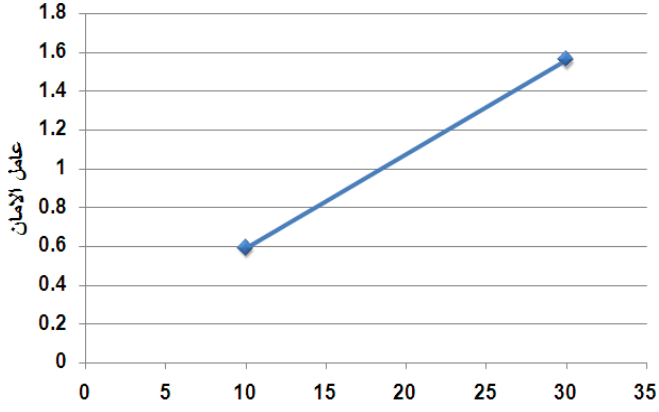
$C$ (KPa)	Fs
10	1.4
25	2

أي أن كلما زادت قيم التماسك ارتفعت قيمة عامل الأمان.

- العامل الخامس هو زاوية الاحتكاك  $\theta$  (10-30)° وكانت النتائج كما يلي:

$\theta$ (Degree)	Fs
10	0.59
30	1.59

وهي تدل على أن عامل الأمان يزداد بزيادة زاوية الاحتكاك، أما المخططات كانت كما يلي:

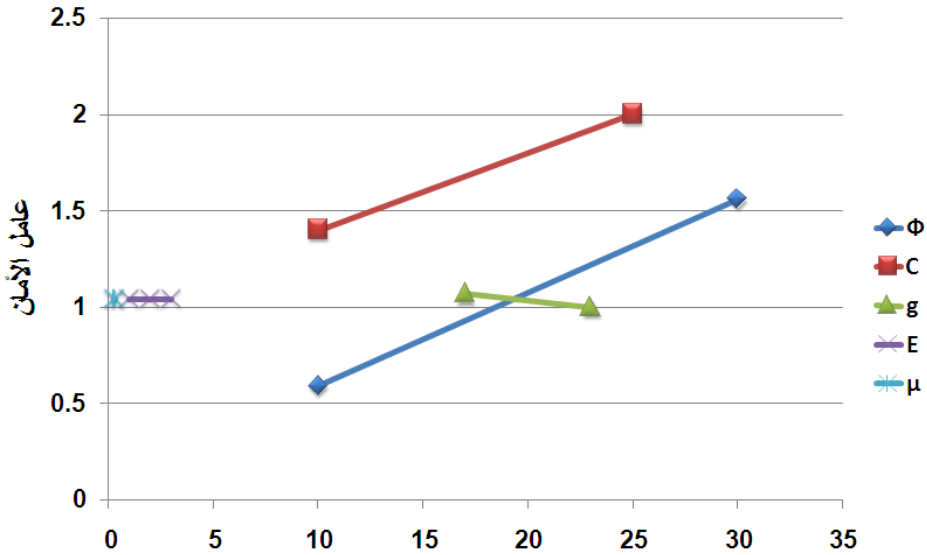


$\phi$  (Degree)

C (KPa)

الشكل (4-6) القيم المتغيرة من تماسك وزاوية الاحتكاك لتربة المنحدر وقيم عامل الأمان الموافقة

مما سبق نستطيع تمثيل كل العوامل الخمس السابقة على مخطط واحد كما يلي:



الشكل (5-6) جميع العوامل المتغيرة وقيم عامل الأمان الموافقة

وبملاحظة المخطط نستطيع القول بأن : تغير كل من عامل المرونة E وعامل بواسون  $\nu$  لا يؤثر على قيمة عامل الأمان بينما هنالك تغير واضح في قيمة عامل الأمان عند تغير كل من التماسك C والاحتكاك  $\phi$  والكثافة  $\gamma$ .

وبما أن طريقة المخططات التجريبية العاملية (الملحق (3-A)) هي أفضل طريقة لاستخدامها في مثل هذه الحالة حيث سيتم اعتبار عوامل التصميم هي: من التماسك C والاحتكاك  $\phi$  والكثافة  $\gamma$  والتي تؤثر بشكل فعال على الاستجابة (عامل الأمان) وبالتالي عدد التجارب التي يجب إجراؤها لاستنتاج معادلة تعطي قيم عامل الأمان وتدخل تأثير كل من التماسك C والاحتكاك  $\phi$  والكثافة  $\gamma$  بحيث تكون هذه المعادلة من الشكل:  $y = f(\phi, c, \gamma)$

$$N = L^K = 2^3 = 8 : (3-A) \text{ يتم تحديد عدد التجارب من المعادلة}$$

حيث أن عدد العوامل المدروسة هي 3 ، وعدد المستويات هو 2 لكل عامل، وبالتالي نكتب مصفوفة التصميم المشفرة الجزئية

و تجدر الإشارة إلى أن بعض المراجع تعتمد في تسمية المستوي المنخفض للعامل المدروس بالرقم 1 بدلاً من -1 ، وتسمية المستوي المرتفع للعامل المدروس بالرقم 2 بدلاً من الرقم +1.

حيث أن العوامل التصميمية للتجارب ومستوياتها تم اعتمادها كما يلي:

مستويات الدراسة		العامل
المستوي الثاني(2)	المستوي الأول(1)	
30	10	العامل الأول هو زاوية الاحتكاك $\phi^0$
25	10	العامل الثاني هو التماسك C
23	17	العامل الثالث هو كثافة التربة $\gamma$

أما مصفوفة التصميم المشفرة فهي تكتب بالشكل:

No Expe	$\phi$	C	$\gamma$	Yi
1	1	1	1	0.97
2	1	2	1	1.58
3	1	2	2	1.33
4	1	1	2	0.83
5	2	1	1	2.08
6	2	2	1	2.83
7	2	2	2	2.52
8	2	1	2	1.9

كما تجدر الإشارة إلى أن قيم Yi وهي قيم الاستجابة (عامل الأمان) قد تم حسابها للمنحدر المدروس باستخدام تقنية تخفيض مقاومة القص SSR باستخدام برنامج Phase<sup>2</sup>.

من المصفوفة السابقة نلاحظ أن شرط التعامد محقق وهو أن عدد تجارب المستويات لكل عامل هو نفسه .

المتوسط العام:

$$Mg = \frac{\sum yi}{n} = \frac{0.97+1.58+1.33+0.83+2.08+2.83+2.52+1.9}{8} = 1.755$$

حساب تأثير كل عامل :

تأثير الاحتكاك:

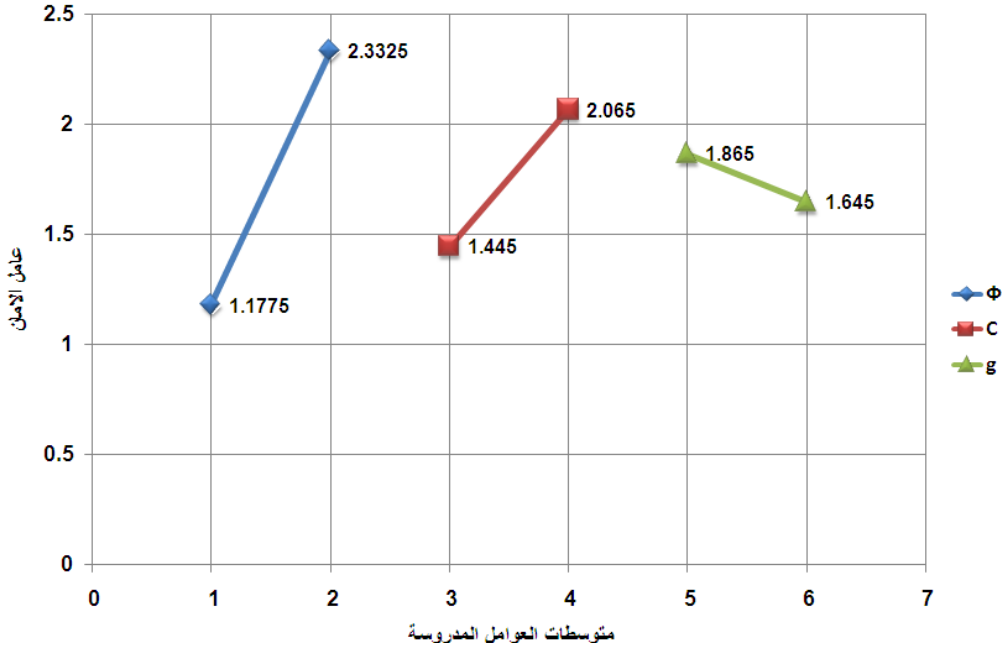
$$\phi = 1: \frac{0.97 + 1.58 + 1.33 + 0.83}{4} = 1.1775, \quad E_{\phi_1} = 1.1775 - 1.755 = -0.5775$$

$$\phi = 2: \frac{2.08 + 2.83 + 2.52 + 1.9}{4} = 2.3325, \quad E_{\phi_2} = 2.3325 - 1.755 = 0.5775$$

وهكذا بالنسبة لبقية العوامل وبالتالي فان مصفوفة المتوسطات:

	$\phi$	$c$	$\gamma$
1	1.1775	1.445	1.865
2	2.3325	2.065	1.645

كما أن مخطط تأثير العوامل مبين بالشكل:



الشكل (6-6) متوسطات تأثير كل عامل

مصفوفة التأثير نكتب بالشكل:

	$\phi$	$c$	$\gamma$
1	-0.5777	-0.31	0.11
2	0.5775	0.31	-0.11

وهي محققة للشرط أن مجموع تأثير مستويين لعامل ما يساوي الصفر.

حساب مصفوفة المتوسطات وذلك لحساب التداخلات بين العوامل:

مثلاً لحساب التداخل بين العاملين  $\phi, \gamma$  يتم حساب المتوسطات:

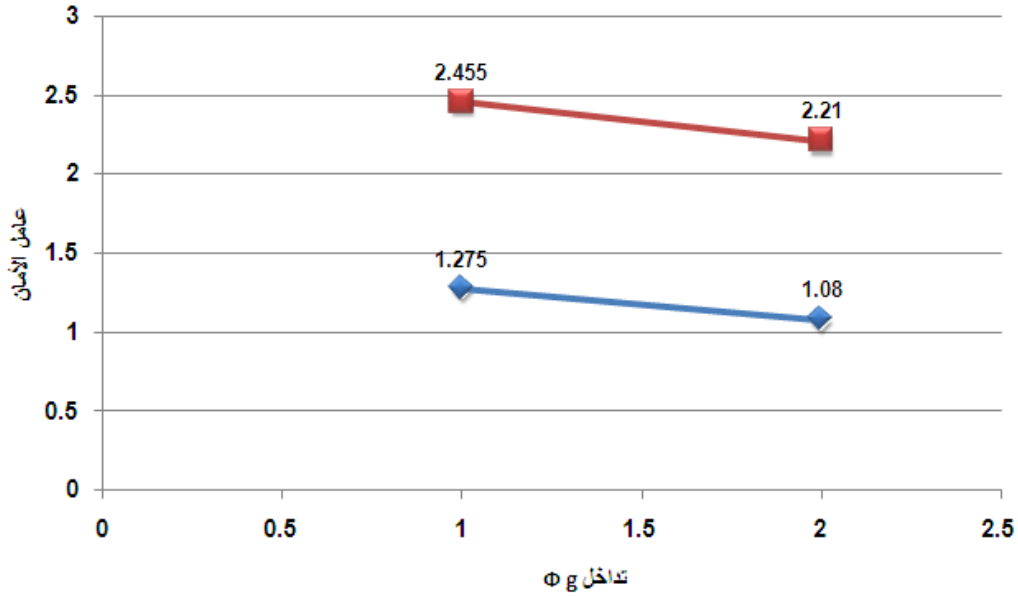
$$M_{\phi=1, \gamma=1} = \frac{0.97 + 1.58}{2} = 1.275, \quad M_{\phi=2, \gamma=1} = \frac{2.08 + 2.83}{2} = 2.455$$

$$M_{\phi=1, \gamma=2} = \frac{1.33 + 0.83}{2} = 1.08, \quad M_{\phi=2, \gamma=2} = \frac{2.52 + 1.9}{2} = 2.21$$

وبالتالي مصفوفة المتوسطات للعاملين  $\phi, \gamma$ :

$M_{\phi,\gamma}$	1	2
1	1.275	1.08
2	2.455	2.21

ومخطط التداخل :

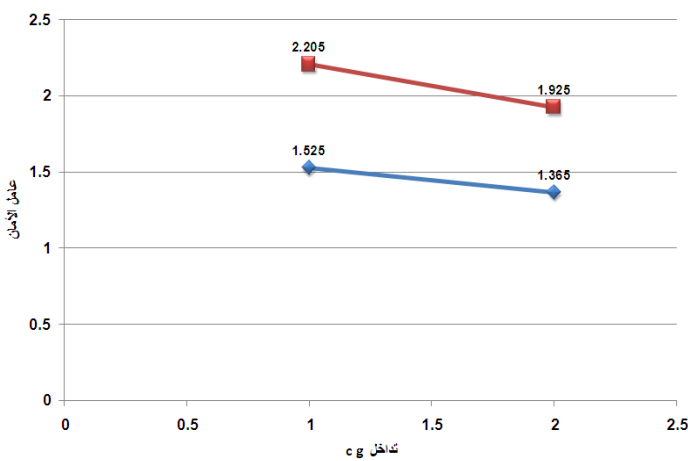


الشكل (7-6) التداخل بين العاملين  $\phi, \gamma$

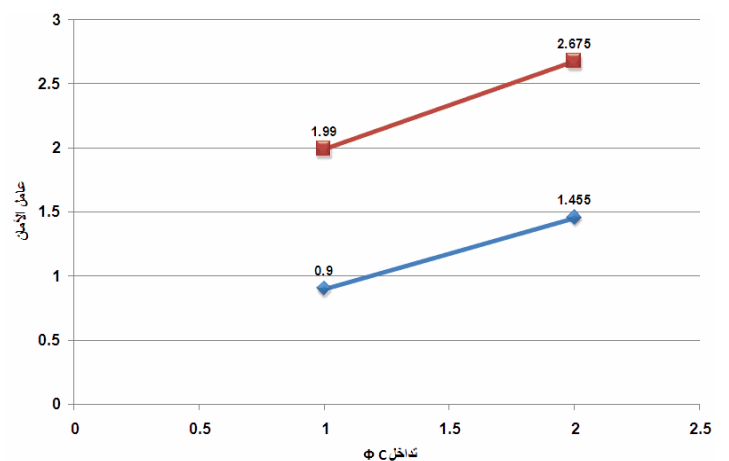
وبنفس الطريقة يتم حساب مصفوفة المتوسطات لتداخل العوامل:

متوسطات التداخل $c, \gamma$			متوسطات التداخل $\phi, c$		
$M_{c,\gamma}$	1	2	$M_{\phi,c}$	1	2
1	1.525	1.365	1	0.9	1.455
2	2.205	1.925	2	1.99	2.675

ومخططات التداخل هي:



تداخل  $c, \gamma$



تداخل  $\phi, c$

الشكل (8-6) مخططات التداخل

حساب مصفوفة التداخلات:

1- التداخل بين عاملين:

$$I_{ai,bj} = M_{ai,bj} - Mg - E_{ai} - E_{bj}$$

تداخل $c, \gamma$			تداخل $\phi, \gamma$			تداخل $\phi, c$		
$I_{c,\gamma}$	1	2	$I_{\phi,\gamma}$	1	2	$I_{\phi,c}$	1	2
1	-0.03	0.03	1	-0.0125	0.0125	1	0.0325	-0.0325
2	0.03	-0.03	2	0.0125	-0.0125	2	-0.0325	0.0325

$$I_{c1,\gamma2} = 1.365 - 1.755 - (-0.31) - (-0.11) = 0.03 \quad \text{مثلاً:}$$

2- التداخل بين ثلاث عوامل:

$$I_{a,b,c} = Y_i - Mg - E_a - E_b - E_c - I_{ab} - I_{ac} - I_{bc} \quad \text{يحسب من العلاقة:}$$

وغالباً ما يتم إهمال هذا الحد.

المعادلة العامة والممثلة لحساب عامل الأمان تعطى بالعلاقة:

$$Y_i = M_g + [E_{\phi 1} \quad E_{\phi 2}] \phi + [E_{c1} \quad E_{c2}] c + [E_{\gamma 1} \quad E_{\gamma 2}] \gamma$$

$$+ \phi^T \begin{bmatrix} I_{\phi 1,c1} & I_{\phi 1,c2} \\ I_{\phi 2,c1} & I_{\phi 2,c2} \end{bmatrix} c + \phi^T \begin{bmatrix} I_{\phi 1,\gamma 1} & I_{\phi 1,\gamma 2} \\ I_{\phi 2,\gamma 1} & I_{\phi 2,\gamma 2} \end{bmatrix} \gamma$$

$$+ \gamma^T \begin{bmatrix} I_{c1,\gamma 1} & I_{c1,\gamma 2} \\ I_{c2,\gamma 1} & I_{c2,\gamma 2} \end{bmatrix} c$$

وبالتالي معادلة حساب عامل الأمان باستخدام المخططات التجريبية العملية لثلاث عوامل تصميمية هي

التماسك والاحتكاك والكثافة هي من الشكل:

$$Y_i = 1.775 + [-0.5775 \quad 0.5775] \phi + [-0.31 \quad 0.31] c + [0.11 \quad -0.11] \gamma$$

$$+ \phi^T \begin{bmatrix} 0.0325 & -0.0325 \\ -0.0325 & 0.0325 \end{bmatrix} c + \phi^T \begin{bmatrix} -0.0125 & 0.0125 \\ 0.0125 & -0.0125 \end{bmatrix} \gamma$$

$$+ \gamma^T \begin{bmatrix} -0.03 & 0.03 \\ 0.03 & -0.03 \end{bmatrix} c$$

تجدر الإشارة إلى أنه تم التحقق من صحة المعادلة السابقة وذلك على الرغم من عدم إدخال تأثير

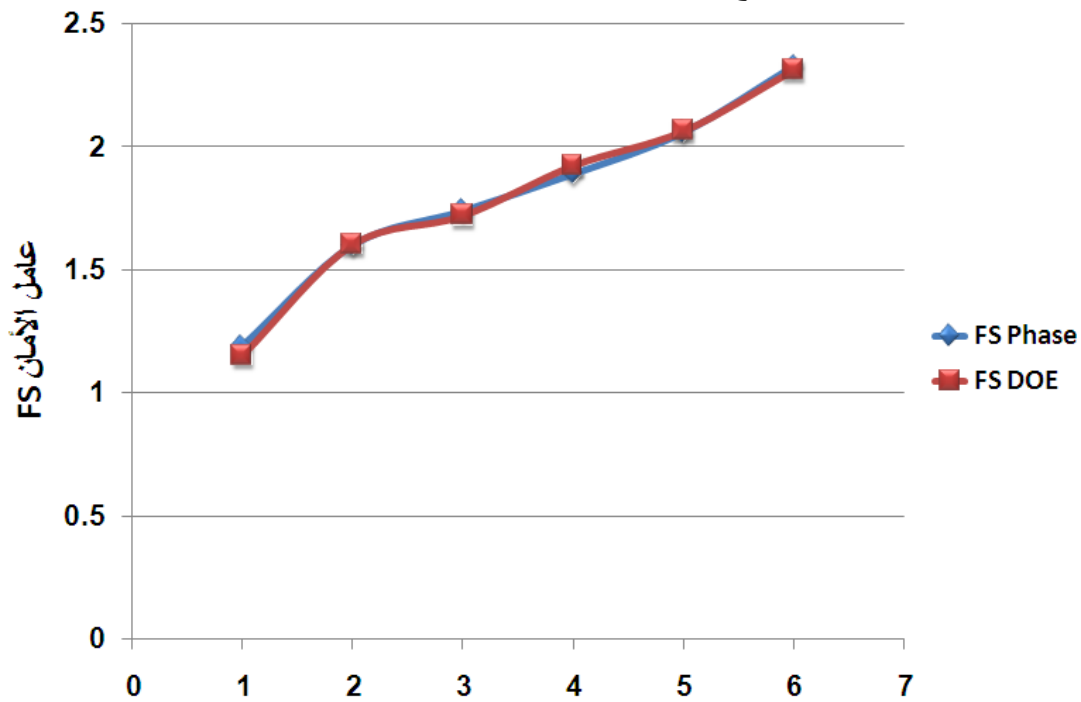
التداخل بين ثلاث عوامل فكانت القيم الناتجة عن المعادلة هي:

رقم التجربة	قيم المعادلة	القيم الأصلية المحسوبة من Phase <sup>2</sup>	الفارق النسبي %
1	0.9675	0.97	-0.2584
2	1.5775	1.58	-0.15848
3	1.3275	1.33	-0.18832
4	0.8275	0.83	-0.30211
5	2.0775	2.08	-0.12034
6	2.8275	2.83	-0.08842
7	2.5175	2.52	-0.0993
8	0.9675	0.97	-0.2584

من النتائج التي حصلنا عليها نجد أن الفارق النسبي بين القيم التي حصلنا عليها من طريقة التصميم التجريبي ومن برنامج Phase أقل من 10% هذا يدل على أن المعادلة التي حصلنا عليها لحساب عامل الأمان صحيحة في حال تغير إما التماسك أو الاحتكاك أو الكثافة ، كما تم تحقيق المعادلة على قيم مختلفة للعوامل السابقة تقع ضمن مجال العوامل ولكنها لم تدخل بشكل مباشر في حساب التجارب وتم تحقيقها مع تغيير نفس القيم باستخدام برنامج Phase، وكانت النتائج كالتالي:

قيم العوامل المحسوبة			FS Phase	FS DOE	الفارق النسبي %
$\phi$	c	$\gamma$			
15	10	17	1.23	1.2462	1.299952
15	15	22	1.31	1.3058	-0.32164
15	15	19	1.4	1.3996	-0.02858
25	20	20.2	2.12	2.1441	1.124015
30	20	23	2.33	2.3138	-0.70015

أما المخططات الممثلة للنتائج السابقة فكانت:



الشكل (9-6) الفرق بين القيم المحسوبة باستخدام المعادلة وباستخدام برنامج Phase

نلاحظ أن النتائج تقريباً متطابقة .

كيفية حساب القيم السابقة في المعادلة: تؤخذ القيم التالية لـ زاوية الاحتكاك 25 ، والتماسك 20، والكثافة 20.2 ، حتى يتم حساب عامل الأمان باستخدام المعادلة السابقة، نحسب الوحدات المشفرة لكل عامل من المعادلة

$$x = \frac{A - A_0}{Step} \quad (2-A)$$

بالنسبة للاحتكاك:

$$step = \frac{30 - 10}{2} = 10$$

$$A_0 = \frac{30 + 10}{2} = 20$$

$$\phi = \frac{25 - 20}{10} = 0.5$$

وكذلك الأمر بالنسبة لالتماسك: قيمة  $c = \frac{1}{3}$ ، وقيمة الكثافة  $\gamma = \frac{1}{15}$  وذلك بالوحدات المشفرة،

بتعويض القيم السابقة في معادلة عامل الأمان:

$$Y_i = 2.1441$$

إن المعادلة السابقة تسمح بحساب عامل الأمان في حال تغير التماسك  $C$  والاحتكاك  $\phi$  والكثافة  $\gamma$  ومن غير الممكن حساب عامل الأمان في حال تغير ميل المنحدر، لذلك كان لابد من إدخال تأثير ميل المنحدر  $\beta$  والتي تؤثر بشكل فعال على الاستجابة (عامل الأمان) وبالتالي عدد التجارب التي يجب إجراؤها لاستنتاج معادلة تعطي قيم عامل الأمان وتدخل تأثير كل من التماسك  $C$  والاحتكاك  $\phi$  والكثافة  $\gamma$  ميل

المنحدر  $\beta$  بحيث تكون هذه المعادلة من الشكل:  $y = f(\phi, c, \gamma, \beta)$

$$N = L^K = 2^4 = 16 \quad (3-A)$$

حيث أن عدد العوامل المدروسة هي 4 ، وعدد المستويات هو 2 لكل عامل، وبالتالي تكتب مصفوفة

التصميم المشفرة الجزئية

وأن العوامل التصميمية للتجارب ومستوياتها تم اعتمادها كما يلي:

مستويات الدراسة		العامل
المستوي الثاني(2)	المستوي الأول(1)	
30	10	العامل الأول هو زاوية الاحتكاك $\phi$
25	10	العامل الثاني هو التماسك $C$
23	17	العامل الثالث هو كثافة التربة $\gamma$
0.8	0.5	العامل الرابع هو ميل المنحدر $\beta$

أما مصفوفة التصميم المشفرة فهي تكتب بالشكل:



No	∅	C	g	β	fs
1	1	1	1	1	0.97
2	1	1	2	1	0.83
3	1	2	1	1	1.58
4	1	2	2	1	1.33
5	2	1	1	1	2.08
6	2	1	2	1	1.9
7	2	2	1	1	2.83
8	2	2	2	1	2.52
9	1	1	1	2	0.6
10	1	1	2	2	0.52
11	1	2	1	2	0.97
12	1	2	2	2	0.81
13	2	1	1	2	1.26
14	2	1	2	2	1.16
15	2	2	1	2	1.74
16	2	2	2	2	1.55

تجدر الإشارة إلى أن قيم  $Y_i$  وهي قيم الاستجابة (عامل الأمان) قد تم حسابها للمنحدر المدروس باستخدام تقنية تخفيض مقاومة القص SSR باستخدام برنامج  $Phase^2$ .  
من المصفوفة السابقة يلاحظ أن شرط التعامد محقق وهو أن عدد تجارب المستويات لكل عامل هو نفسه .

المتوسط العام:

$$Mg = \frac{\sum yi}{n} = \frac{0.97+0.83+1.58+-----+1.55}{16} = 1.416$$

بحساب تأثير كل عامل :

$$\phi = 1: \frac{0.97+0.83+1.58+1.33+0.6+0.52+0.97+0.81}{8} = 0.95125 \quad E_{\phi 1} = 0.95125 - 1.416 = -0.465$$

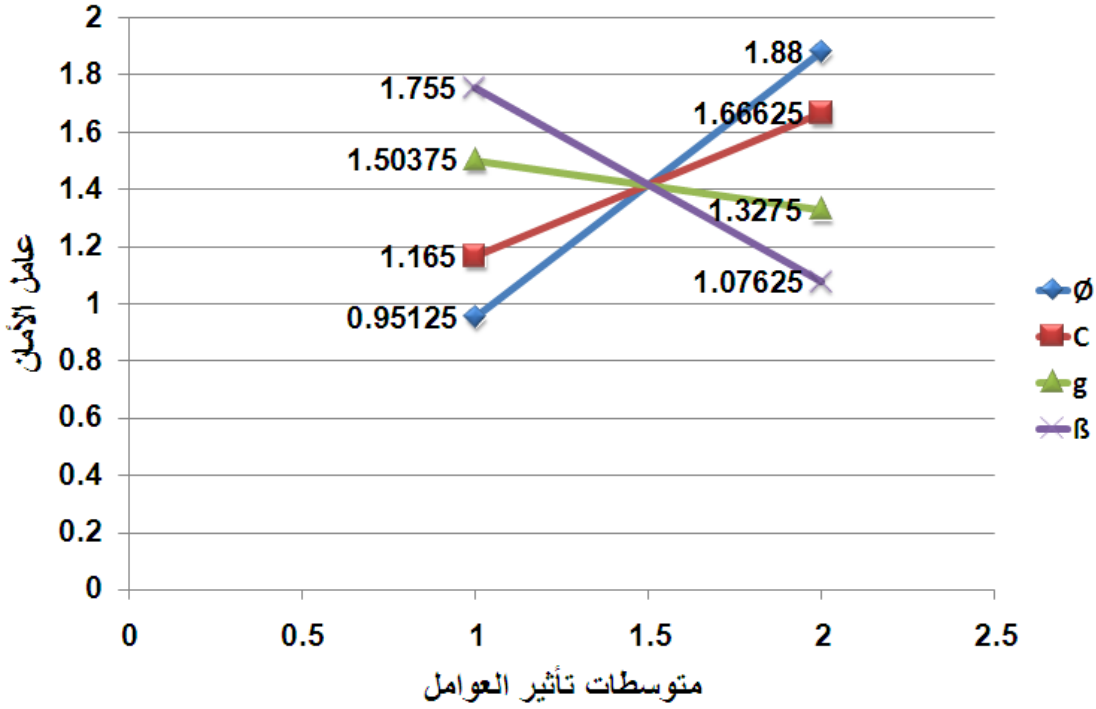
$$\beta = 2: \frac{0.6+0.52+0.97+0.81+1.26+1.16+1.74+1.55}{8} = 1.076, \quad E_{\beta 2} = 1.076 - 1.416 = -0.34$$

تأثير الاحتكاك وميل المنحدر:

وهكذا بالنسبة لبقية العوامل وبالتالي مصفوفة المتوسطات هي:

	∅	c	γ	β
1	0.95125	1.165	1.504	1.755
2	1.88	1.666	1.328	1.076

كما أن مخطط تأثير العوامل مبين بالشكل:



الشكل (10-6) متوسطات تأثير كل عامل

كما أن مصفوفة التأثير تكتب بالشكل:

	$\phi$	$c$	$\gamma$	$\beta$
1	-0.465	-0.251	0.088	0.339
2	0.464	0.25	-0.088	-0.34

وهي محققة للشرط أن مجموع تأثير مستويين لعامل ما يساوي الصفر.

حساب مصفوفة المتوسطات لعاملين وذلك لحساب التداخلات بين العوامل:

مثلاً لحساب التداخل بين العاملين  $\phi, \gamma$  نحسب المتوسطات:

$$M_{\phi=1, \gamma=1} = \frac{0.97 + 1.58 + 0.6 + 0.97}{4} = 1.03, \quad M_{\phi=2, \gamma=1} = \frac{2.08 + 2.83 + 1.26 + 1.74}{4} = 1.9775$$

$$M_{\phi=1, \gamma=2} = \frac{0.83 + 1.33 + 0.52 + 0.81}{4} = 0.8725, \quad M_{\phi=2, \gamma=2} = \frac{1.9 + 2.52 + 1.16 + 1.55}{4} = 1.7825$$

وبالتالي مصفوفة المتوسطات للعاملين  $\phi, \gamma$ :

$M_{\phi, \gamma}$	1	2
1	1.03	0.873
2	1.978	1.783

وبنفس الطريقة يتم حساب مصفوفة المتوسطات لتداخل العوامل:

متوسطات التداخل $c, \gamma$			متوسطات التداخل $\phi, \beta$			متوسطات التداخل $\phi, c$		
$M_{c,\gamma}$	1	2	$M_{\phi,\beta}$	1	2	$M_{\phi,c}$	1	2
1	1.228	1.103	1	1.178	0.725	1	0.73	1.173
2	1.78	1.553	2	2.333	1.428	2	1.6	2.16

متوسطات التداخل $\gamma, \beta$			متوسطات التداخل $c, \beta$		
$M_{\gamma,\beta}$	1	2	$M_{c,\beta}$	1	2
1	1.865	1.143	1	1.445	0.885
2	1.645	1.01	2	2.065	1.268

و يمكن رسم تداخلات العوامل كما يلي:

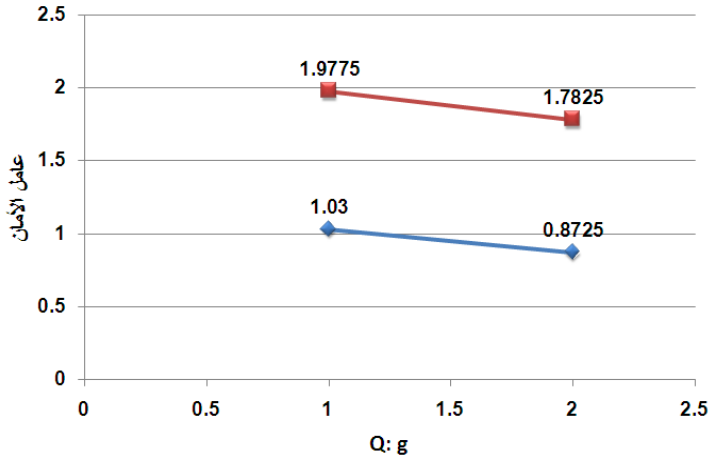
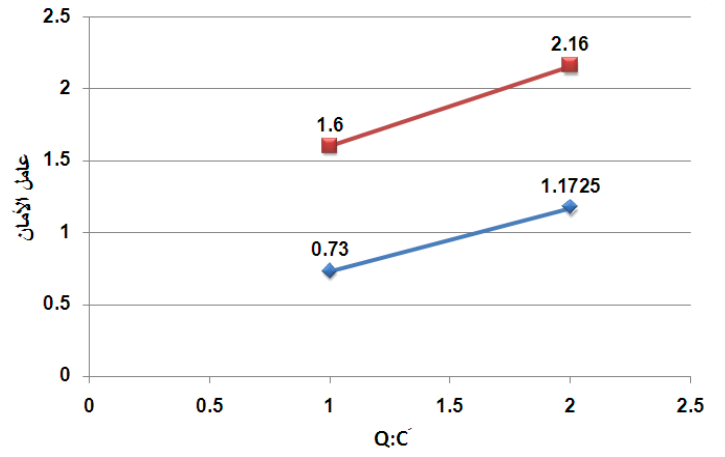
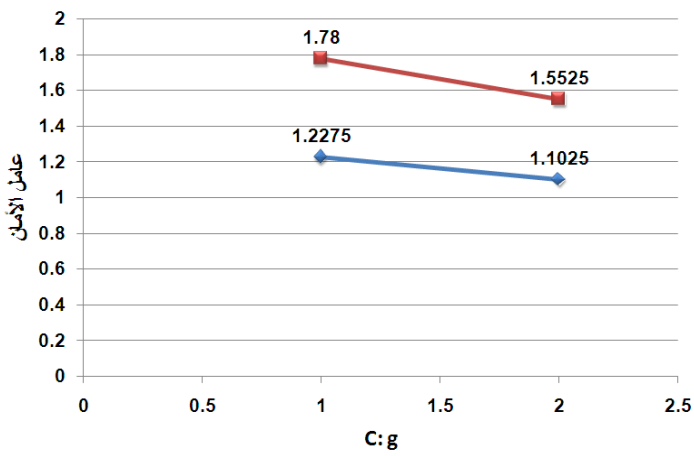
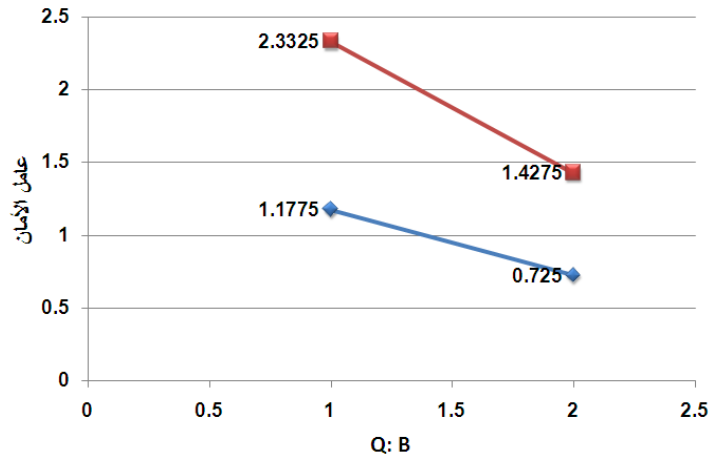
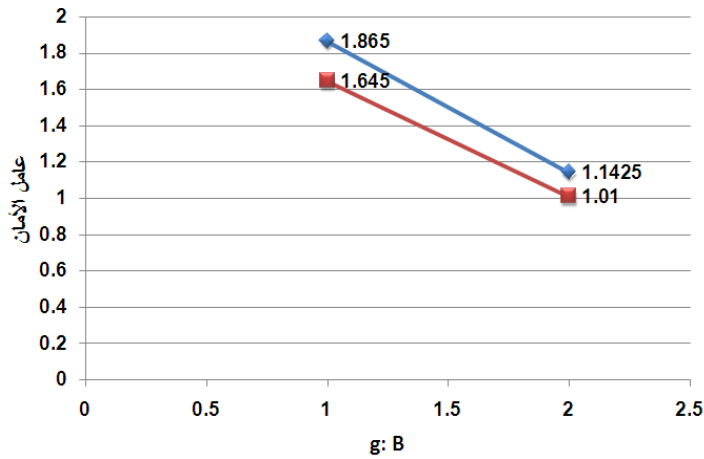
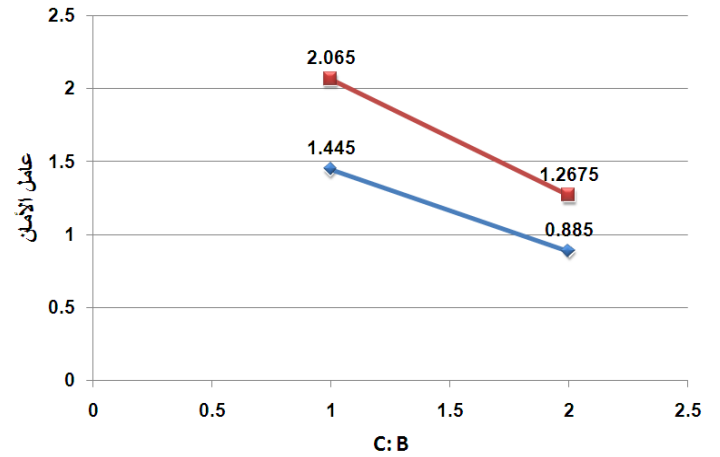
حساب مصفوفة التداخلات:

1- التداخل بين عاملين:

$$I_{ai,bj} = M_{ai,bj} - Mg - E_{ai} - E_{bj}$$

تداخل $\phi, \beta$			تداخل $\phi, \gamma$			تداخل $\phi, c$		
$I_{\phi,\beta}$	1	2	$I_{\phi,\gamma}$	1	2	$I_{\phi,c}$	1	2
1	-0.112	0.114	1	-0.009	0.01	1	0.03	-0.028
2	0.114	-0.112	2	0.01	-0.009	2	-0.029	0.03
تداخل $\gamma, \beta$			تداخل $c, \beta$			تداخل $c, \gamma$		
$I_{\gamma,\beta}$	1	2	$I_{c,\beta}$	1	2	$I_{c,\gamma}$	1	2
1	0.022	-0.021	1	-0.059	0.06	1	-0.025	0.026
2	-0.022	0.022	2	0.059	-0.058	2	0.026	-0.025

مثلاً:  $I_{c1,\beta2} = 1.445 - 1.416 - (-0.0251) - 0.339 = -0.059$

الشكل (12-6) تداخل العاملين  $\phi\gamma$ الشكل (11-6) تداخل العاملين  $\phi c$ الشكل (14-6) تداخل العاملين  $c\gamma$ الشكل (13-6) تداخل العاملين  $\phi\beta$ الشكل (16-6) تداخل العاملين  $\gamma\beta$ الشكل (15-6) تداخل العاملين  $c\beta$ 

المعادلة العامة والممثلة لحساب عامل الأمان تعطى بالعلاقة:

وبالتالي معادلة حساب عامل الأمان باستخدام المخططات التجريبية العاملة هي من الشكل:

$$F_s = 1.416 + [-0.465 \quad 0.465] \phi + [-0.251 \quad 0.251] c + [0.088 \quad -0.088] \gamma$$

$$+ [0.339 \quad -0.34] \beta + \phi^T \begin{bmatrix} 0.03 & -0.028 \\ -0.029 & 0.03 \end{bmatrix} c + \phi^T \begin{bmatrix} -0.009 & 0.01 \\ 0.01 & -0.009 \end{bmatrix} \gamma$$

$$+ \phi^T \begin{bmatrix} -0.112 & 0.114 \\ 0.114 & -0.112 \end{bmatrix} \beta + c^T \begin{bmatrix} -0.025 & 0.026 \\ 0.026 & -0.025 \end{bmatrix} \gamma$$

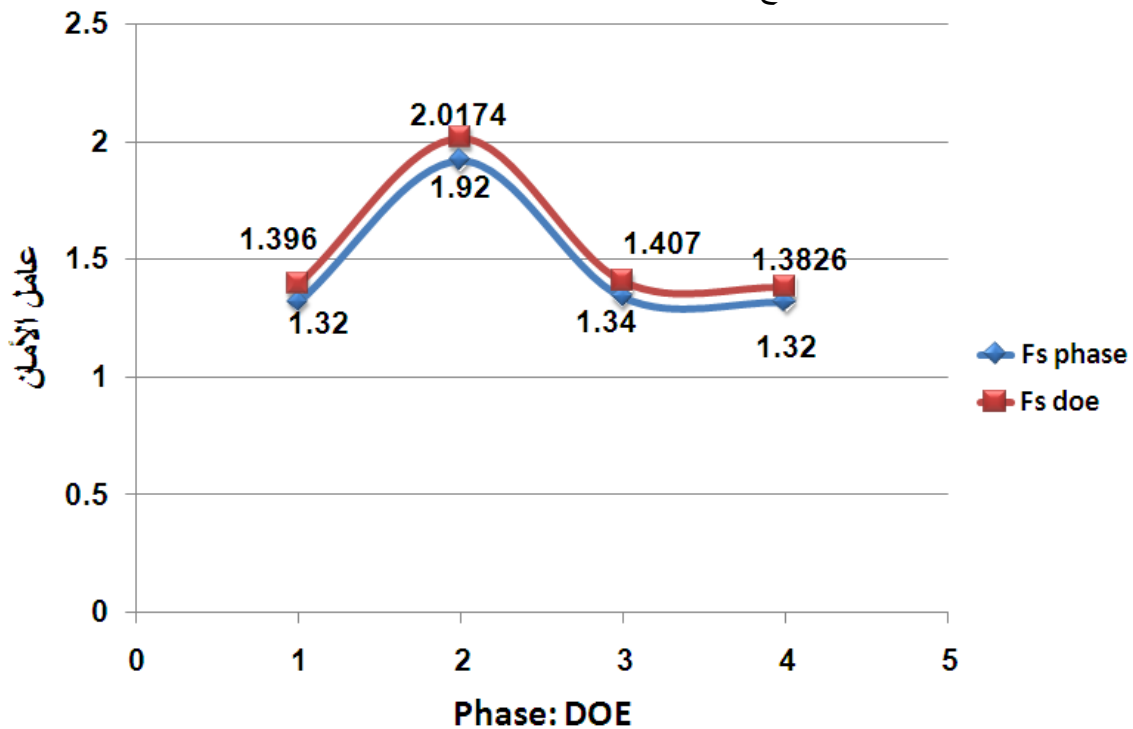
$$+ c^T \begin{bmatrix} -0.059 & 0.06 \\ 0.059 & -0.058 \end{bmatrix} \beta + \gamma^T \begin{bmatrix} 0.022 & -0.021 \\ -0.022 & 0.022 \end{bmatrix} \beta$$

تم تحقيق المعادلة على قيم مختلفة للعوامل السابقة تقع ضمن مجال العوامل ولكنها لم تدخل بشكل مباشر في حساب التجارب وتم تحقيقها مع تغيير نفس القيم باستخدام برنامج Phase، وكانت النتائج كالتالي:

قيم العوامل المحسوبة				FS Phase	FS DOE	الفارق النسبي %
$\phi$	c	$\gamma$	B			
15	20	19	0.6	1.32	1.396	5.4441
30	20	23	0.6	1.92	2.0174	4.8280
15	25	17	0.7	1.34	1.407	4.7619
25	15	22	0.7	1.32	1.3826	4.5277

من القيم التي تم الحصول عليها يلاحظ أن الفارق النسبي بين نتائج معادلة التصميم التجريبي DOE وقيم عامل الأمان باستخدام Phase هي أقل من 10% وهذا يدل على أن طريقة التصميم التجريبي صالحة للاستخدام في تحليل المنحدرات المتجانسة عند تغيير قيم العوامل الأربعة من احتكاك وتماسك وكثافة وميل المنحدر.

أما المخططات الممثلة للنتائج السابقة فكانت:



الشكل (6-17) الفرق بين القيم المحسوبة باستخدام المعادلة وباستخدام برنامج Phase

يلاحظ أن النتائج تقريباً متطابقة .

كيفية حساب القيم السابقة في المعادلة: تؤخذ القيم التالية ل زاوية الاحتكاك 25 ، والتماسك 15، والكثافة 22، وميل المنحدر  $\beta=0.7$  حتى نستطيع حساب عامل الأمان باستخدام المعادلة السابقة، نحسب الوحدات المشفرة لكل عامل من المعادلة

$$x = \frac{A - A_0}{Step} \quad (2-A)$$

بالنسبة للاحتكاك:

$$step = \frac{30 - 10}{2} = 10$$

$$A_0 = \frac{30 + 10}{2} = 20$$

$$\phi = \frac{25 - 20}{10} = 0.5$$

وكذلك الأمر بالنسبة لالتماسك: قيمة  $c = -\frac{1}{3}$ ، وقيمة الكثافة  $\gamma = 0.6666$ ،  $\beta = \frac{1}{3}$  وذلك

بالوحدات المشفرة نعوض القيم السابقة في معادلة عامل الأمان:

$$Y_i = 1.3826$$

## الفصل السابع

### النتائج والتوصيات

#### 1-7 النتائج

1- تم في هذا البحث تطبيق طريقة تخفيض مقاومة القص SSR على المنحدرات المتجانسة وذلك لحساب عامل أمان المنحدرات .

2- كما تم عرض لأهم طرق استقرار المنحدرات باستخدام طرق التوازن الستاتيكي LEM والتي تعتبر واحدة من أساسات تحليل استقرار المنحدرات في الهندسة الجيوتكنيكية هي مازالت حتى وقتنا الحاضر طرق مرجعية يمكن الاعتماد عليها في التحليل والتصميم، على الرغم من انشغال هذه الطرق بعدة عوامل لا تتعلق بخواص المنحدر الجيومترية أو الميكانيكية لتحديد عامل أمان المنحدر.

3- تم في هذا البحث مقارنة نتائج تحليل استقرار المنحدر باستخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR مع طريقة Bishop والتي تدرج تحت طرق التوازن الستاتيكي، حيث أن النتائج لم تختلف كثيراً و قد كانت النتائج متقاربة

4- فمن خلال طريقة SSR يستطيع المهندس معرفة سلوك مواد المنحدر وتأثيرها على آلية وشكل انهيار المنحدر على العكس من طرق التوازن الحدي LEM والتي لم تأخذ بعين الاعتبار سلوك المادة بشكل فعلي، فكل طريقة تفترض شكل انهيار للمنحدر بعيداً عن طبيعة التربة المكونة له وعن ظروف التصريف أو حتى عن تشديد التربة ومدى تأثير سرعة التصريف على آلية انهيار المنحدر فطرق التوازن الحدي تعتمد على فرض القوى الداخلية بين الشرائح وفرض ميول هذه القوى، كما أن طرق التوازن الحدي LEM لا تعطي أي فكرة عن شكل التشوهات والإجهادات وطريقة تغيرها قبل وأثناء الانهيار على العكس في طريقة SSR إذ يمكن حساب الإجهادات والتشوهات وحتى رسم مخططات العزوم في حال وجود مواد داعمة ضمن تربة المنحدر، فمن خلال طريقة SSR يمكن معرفة المواد التي وصلت إلى الانهيار ومعرفة أية طبقة ستتهار أولاً، وبالتالي فإن البرمجيات المتطورة تساعدنا في معرفة مدى التواصل بين شكل المنحدر ونوعية تربته ومدى تأثيرهما على آلية انهيار المنحدر و ذلك من خلال مفهوم التقارب الذي تعتمد عليه طريقة العناصر المحدودة و تعريف عامل الأمان للمنحدر فعندما تزداد الانتقالات في المنحدر بشكل كبير و عند هذه النقطة يصبح المنحدر غير قابلاً للحل باستخدام طريقة العناصر المحدودة عندها فقط يحصل الانهيار.

5- إن تقنية FEM SSR مثلها مثل أي طريقة عددية تقريبية من الممكن أن يحصل فيها أخطاء وهذه الأخطاء إما أن تكون ناتجة عن خطأ أثناء بناء النموذج العددي للمنحدر مثل: عدم اختيار النموذج المناسب ومتحولاته، الشروط الحدية، تعريف مساند المنحدر .

أو أن تكون الأخطاء عبارة عن أخطاء عددية: وذلك أثناء دراسة استقرار المنحدر باستخدام FEM، لذلك كان من الواجب على المهندس الانتباه إلى تلك الأخطاء وذلك عن طريق إتباع خطوات بناء النموذج العددي ومناقشة النتائج التي يحصل عليها للوصول إلى عامل الأمان الصحيح ودون حدوث أخطاء عددية.

إذ لا يمكن للحاسب أن يأخذ دور العقل البشري في المحاكمة والمنطق والبرمجيات المتوفرة ما هي إلا أدوات تزيد من قدرة المهندس لفهم سلوك المنحدر .

6- من خلال ما سبق نجد أن برنامج PHASE2 قد سهل وبشكل كبير تحليل استقرار المنحدرات باستخدام طريقة العناصر المحدودة وذلك عن طريق وجود ما يسمى طريقة تخفيض مقاومة القص ضمن برنامج PHASE<sup>2</sup> وذلك فقط بالنقر على خيار Strength Reduction options ضمن البرنامج وإعطاء القيم المطلوبة نحصل على عامل تخفيض مقاومة القص الحرج SRF والذي لا يستغرق الحصول عليه عدة دقائق بعد بناء النموذج العددي في برنامج PHASE<sup>2</sup>، هذه العملية كانت تتطلب وقتاً أكثر من ذلك بكثير عند دراسة المنحدر باستخدام طرق التوازن الحدي LEM، إلا أنه يجب الانتباه إلى أنه صحيح أن برنامج PHASE<sup>2</sup> قد سهل عملية تحليل استقرار المنحدرات وبشكل كبير إلا أنه قد أضاف عبئاً أكبر على المهندس فبالإضافة إلى أنه يجب فهم سلوك المنحدر ومتحولاته وهو أمر ليس بالسهل يجب على المهندس أن يكون ملماً بالطرق العددية وذلك بسبب استخدام الطرق العددية لحساب استقرار المنحدرات وفق برنامج PHASE<sup>2</sup> لأن البرنامج يقوم فقط بالحساب ولا يستطيع أن يحل مكان العقل البشري.

7- كما تم في هذا البحث استخدام طريقة التصميم التجريبي DOE في الوصول إلى نموذج رياضي تجريبي يمكن من خلاله حساب عامل الأمان للمنحدرات المتجانسة وذلك عند تغيير عوامل التصميم الأربعة من تماسك و احتكاك و ميل للمنحدر المتجانس، إذ أن الفهم الجيد للمسألة المدروسة وتحديد المتغيرات المؤثرة عليها وتحديد الاستجابات تسمح للمهندس بتطبيق طريقة التصميم التجريبي DOE وهذه المرونة التي تعطيها طريقة التصميم التجريبي DOE تعود إلى أنها طريقة منهجية ومنظمة فهي تسمح بتغيير عوامل التصميم للقيام بتجارب متنوعة ولكن هذا التغيير في العوامل ليس اعتباطياً أو عشوائياً بل بشكل منظم و ممنهج ضمن مصفوفة التصميم المشفرة، وهي تعطي تأثير كل عامل من عوامل التصميم من تماسك و احتكاك وكثافة وميل على عامل الأمان ومن ثم تحديد التداخل بين عاملين لنحصل في النهاية على معادلة لحساب عامل الأمان حيث أن الاختلاف في القيم لحساب عامل الأمان باستخدام المعادلة التي حصلنا عليها من طريقة التصميم التجريبي و بين القيم التي حسبت باستخدام طريقة SSR لم يزيد عن 5.4% وذلك عند تطبيق هذه الطريقة على قيم واقعة ضمن المجال المدروس.

8- من خلال طريقة تخفيض مقاومة القص التي تم إتباعها لتحليل استقرار المنحدر يمكن القول أن طرق استقرار المنحدرات قد دخلت مرحلة جديدة حيث أن المهندسين ليسوا بحاجة للتفكير في شكل سطح الانهيار هل هو دائري أم لا، و مدى قدرة الطريقة المدروسة على محاكاة السلوك الفعلي للمنحدر أثناء الانهيار و مدى توافقها مع التوازن الستاتيكي بل هنالك متحولات أخرى يمكن من خلالها معرفة ما هي أكثر العوامل المؤثرة على استقرار المنحدر، كما أن طريقة ربط متحولات التصميم و الداخلة في حساب استقرار المنحدر عن طريقة نموذج رياضي باستخدام طريقة التصميم التجريبي DOE قد تساهم في تطور طرق تحليل الاستقرار، و على أقل تقدير يمكن أن تساهم في تحديد قيمة مبدئية لعامل الأمان يمكن استخدامها في برنامج Phase<sup>2</sup>.



## 2-7 التوصيات:

1- نقترح استخدام طريقة تخفيض مقاومة القص SSR في تحليل استقرار المنحدرات و ذلك في مرحلة التصميم و مقاطعة الحلول الناتجة عنها مع طرق التوازن الحدي LEM و خصوصاً في المنشآت الهامة كالسدود.

2- معظم المناهج الجامعية لا تتضمن فصولاً عن النمذجة العددية التي تعتبر جديدة في مجال الهندسة الجيوتكنيكية لذلك نقترح أن تتضمن المناهج بعض المفاهيم الرئيسية عن النمذجة العددية.

3- نقترح لأبحاث مستقبلية أن يتم تحليل استقرار المنحدرات غير المتجانسة و التي تتخللها طبقات ضعيفة و إيجاد عوامل التصميم المؤثرة في استقرار المنحدر و من ثم إيجاد نموذج رياضي يمكن أن يحسب الاستقرار حيث أن هنالك طرقاً في التصميم التجريبي تستخدم لهذه الغاية لا بل هنالك برامج تستخدم تقنية التصميم التجريبي للوصول إلى نموذج رياضي للمسألة المدروسة.

## الملحق A

### مفاهيم أساسية عن التصميم التجريبي

### Basic Concepts About Design Of Experiment

#### 1-A مقدمة

تم تطوير طريقة التصميم التجريبي (DOE) في أوائل العشرينات من القرن الماضي من قبل Sir Ronald Fisher حيث استخدم Fisher طريقة التصميم التجريبي لدراسة تأثير السماد وعوامل أخرى على الحقول الزراعية ومنذ ذلك الحين لاقت طريقة التصميم التجريبي انتشاراً واسعاً في عدة مجالات، [14] ويمكن القول بأن طريقة التصميم التجريبي قد مرت بأربع عصور، [16]:

#### ❖ الأصول الزراعية: The agricultural origins

وتمتد هذه الفترة ما بين 1918 وأربعينيات القرن الماضي 1940 وقد طورت من قبل R.A.Fisher وزملائه، والتي كان لها التأثير الكبير على العلم الزراعي، وأوجد مفهوم التصميم العاملية Factorial designs ومفهوم تحليل التباين Analysis Of Variance ANOVA .

#### ❖ العصر الصناعي الأول:

الذي امتد ما بين 1951 وحتى أواخر السبعينيات وتم تطويره من قبل Box & Wilson فقد ظهر مفهوم سطوح الاستجابة Response Surfaces الذي تم استخدامه في الكيمياء والصناعات العملية.

#### ❖ العصر الصناعي الثاني:

حيث ظهرت فيه مبادرات تحسين الجودة في العديد من الشركات وقد بدأت من أواخر السبعينيات وحتى 1990، كما ظهرت فيه بارامترات التصميم الخاصة بطريقة Taguchi and robust parameter design أو ما يعرف باسم طريقة process robustness.

#### ❖ العصر الحديث:

منذ بداية 1990 وظهور الحواسيب دخلت تقنية التصميم التجريبي DOE في مجال التقنيات الحاسوبية وبدأ معها استخدام DOE في مجال الحواسيب والتجارب الحاسوبية.

#### 2-A إستراتيجية التجريب: Strategy of Experimentation

هنالك عدة استراتيجيات يمكن أن يتبعها الباحثون أثناء التحري عن ظاهرة معينة تكون هي مجال الدراسة، من هذه الطرق الإحصائية وتدرج تحت طريقة التصميم التجريبي DOE [16] :

#### ❖ التجربة والخطأ Trial and Error

هذه الطريقة يمكن أن تستمر بشكل غير محدد، وهي لا تضمن الوصول إلى أفضل حل.

#### ❖ منهج تغيير عامل واحد: One-Factor-At-a-Time (OFAT) Approach

وهو منهج يعتمد على أغلب المهندسين، حيث يتم تغيير عامل واحد (متغير) مع المحافظة على بقية العوامل (المتغيرات) الأخرى ثابتة أثناء القيام بالتجربة، يعتمد هذا المنهج على التخمين والصدفة ويحتاج إلى عدد كبير من المصادر ليعطي كمية قليلة من المعلومات عن العملية، لذلك هي طريقة غير كفوءة

وتحتاج إلى زمن كبير كما من الممكن أن تعطي قيم مغلوبة عن الحالة المدروسة [14]، وهي لا تعطي التداخل بين عوامل التصميم [16].

#### ❖ المنهجية العاملية: Factorial Approach

التصاميم العاملية Factorial Designs تسمح للباحث بدراسة التأثير المشترك للعوامل (بارمترات التصميم)، ويندرج تحت هذا المفهوم ما يسمى بالتصاميم العاملية الكاملة Full Factorial Designs وفيه يتم دراسة كافة التركيبات المحتملة لمستويات العوامل وهي تستخدم عندما لا يزيد عدد العوامل المدروسة أو بارمترات التصميم عن 4، كما يندرج مفهوم التصاميم العاملية الجزئية Fractional Factorial Designs وهو مستخدم بشكل كبير في الصناعة فهو يقلل التكاليف التي يحتاجها إجراء التصاميم العاملية الكاملة، [14].

وبالتالي يمكن أن نلخص المنهجية العاملية بأنها طريقة حديثة وصحيحة فهي منهجية تسمح بتغيير العوامل مع بعضها، وبالتالي نستطيع تحديد كيفية تداخل العوامل مع بعضها البعض [16]. وتجدر الإشارة إلى أن جميع طرق التصميم التجريبي DOE مبنية على نفس المبادئ الإحصائية وطرق تحليل التباين Analysis Of Variation (ANOVA) وتحليل الانحدار Regression Analysis [16].

### **3-A التصميم الإحصائي للتجارب: (DOE) Statistical design of experiments**

إن الفهم الجيد لمعنى التصميم الإحصائي للتجارب يتطلب تعريف بعض المفاهيم التالية:

الإحصاء Statistics: هو علم صناعة القرارات الذكية بناءً على البيانات [17].

Statistics is the science of making intelligent decisions based on data.

البيانات Data: هي المعلومات المجمعّة ضمن مجموعة [17].

Any information grouped into a set

إن التصميم الإحصائي للتجارب: هو عملية التخطيط للتجارب بحيث تكون البيانات المناسبة قابلة

للتحليل بالطرق الإحصائية، والتي تنتج من استنتاجات صالحة وموضوعية وذات معنى للبيانات، [16].

إن عملية التصميم الإحصائي للتجارب تتضمن معيارين هما:

-التصميم

-التحليل الإحصائي

إن كل تجربة تتضمن سلسلة متتالية من الخطوات [14]، [16]:

1- الحدس Conjecture: وهي الفرضية التي تحفز القيام بالتجربة.

2- التجربة Experiment: التي يتم إجراؤها للتحري عن الحدس.

3- التحليل Analysis: التحليل الإحصائي للبيانات الناتجة عن التجربة.

4- النتيجة Conclusion: وهي تتضمن ما تم اكتشافه عن الحدس الأصلي من التجربة.

#### 4-A المبادئ الرئيسية للتصميم الإحصائي للتجارب

##### :The Basic principles of Statistical DOE

يعتمد التصميم الإحصائي للتجارب على ثلاثة مبادئ رئيسية، [16]:

- 1- النسخ المتماثل Replication: وفيه يتم تكرار التجربة لزيادة الدقة [17]، فهو يسمح لنا بتقدير الخطأ التجريبي Experimental Error كما يسمح بتقدير أكثر دقة لقيمة متوسط العينة.
- 2- التوزيع العشوائي Randomization: وهو يعتبر حجر الزاوية في جميع الأساليب الإحصائية، فهو يساعد في تخفيض الانحياز وأخطاء النظام systematic errors.
- 3- الحظر Blocking: يزيد الدقة في التجربة، والعوامل الخارجية factor out هي متغيرات خارج الدراسة.

##### 5-A أنواع المتغيرات Types of Variables

###### **Background variables المتغيرات الثانوية**

وهي متغيرات يمكن تمييزها وقياسها إلا أن لا يمكن التحكم بها. ويمكن التعامل معها على أنها متغيرات مساعدة covariates بدلاً عن المتغيرات الأساسية Primary Variables [19].

###### **Primary Variables المتغيرات الأولية**

هي المتغيرات ذات الاهتمام variables of interest للباحث، وهي متغيرات مستقلة independent variables ومن الممكن أن تكون مصادر محتملة للتنوع في الاستجابة، تشمل هذه المتغيرات معالجة وتصميم التراكيب Treatment and Design Structures والتي يشار إليها كعوامل Factors [19].

###### **Constant variables المتغيرات الثابتة**

هي متغيرات يمكن التحكم بها وقياسها، ولكن لسبب ما سيتم اعتبارها ثابتة خلال فترة الدراسة، سيؤدي هذا الإجراء إلى ارتفاع صلاحية النتائج وذلك بالتقليل من مصادر التغيير الغريبة والناجمة عن إدخال البيانات، [19].

###### **Uncontrollable (Hard-to-Change) variables المتغيرات غير المسيطر عليها (صعبة التغيير)**

هي تلك المتغيرات الموجودة ولكن الشروط منعها من التأثير، أو من الصعب قياسها (بسبب الكلفة أو القيود الطبيعية).

الخطأ التجريبي Experimental Error ينتج عن التأثيرات المؤثرة للمتغيرات غير المسيطر عليها، التي ستؤدي إلى تقييمات أقل دقة لتأثير المتغيرات الأولية والثانوية، [19]. على التصميم التجريبي أن يتحكم أو يزيل هذه الأنواع من المتغيرات قدر المستطاع وذلك لزيادة الثقة في النتائج النهائية، [19].

إن دراسة ظاهرة معينة تكون بالتركيز على قياسات معينة، كمثال على ذلك استهلاك الغاز يتعلق بسرعة العربة، قوة المحرك، طريقة القيادة، اتجاه وقوة الرياح، تضم الإطارات، رفوف الأمتعة، نوع

السيارة، عدد الركاب ..... وهكذا، محصول الذرة مثلاً: يعتمد على نوع التربة، نوعية السماد المضاف، التعرض للشمس، الطقس، تنوع الذرة وغيرها من العوامل، [20].

رياضياً، يمكن أن نكتب القياسات ذات الاهتمام measurement of interest والتي سوف ندعوها الاستجابة (y) Response كتابع لعدة متغيرات  $x_i$  Variables أو ما اصطلح على تسميته عوامل Factors بالشكل التالي، [20]:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (1-A)$$

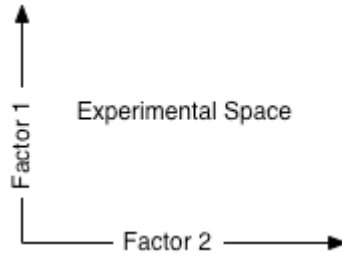
وبالتالي تنهي دراسة ظاهرة معينة بتحديد التابع  $f$  المتعلق بالاستجابة للعوامل  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$  [20].

حتى يتم فهم التصميم التجريبي لابد من معرفة بعض المصطلحات ومنها:

### **1-6-A الفضاء (المجال) التجريبي Experimental Space**

يتطلب التصميم التجريبي إدراك المفهوم الأساسي للمجال التجريبي للعوامل المدروسة، لتوضيح المجال التجريبي تخطيطياً يتم تمثيل كل عامل مستمر continuous factor على محور مدرج وموجه وفي حال وجود عامل آخر مستمر يتم تمثيله بمحور مشابه ومتعامد (يشكل معه زاوية قائمة 90) مع المحور الممثل للعامل الأول، رياضياً هذا المخطط الديكارتي والمعروف بالفضاء الإقليدي Euclidean space ذو البعدين، هذه المنطقة تدعى المجال التجريبي، [20].

المجال التجريبي يتألف من نقاط العامل المستوي الأول  $\times$  العامل الثاني حيث أن كل نقطة تمثل اختبار تجريبي experimental trial [20] كما في الشكل (1-A).



الشكل (1-A) المجال التجريبي

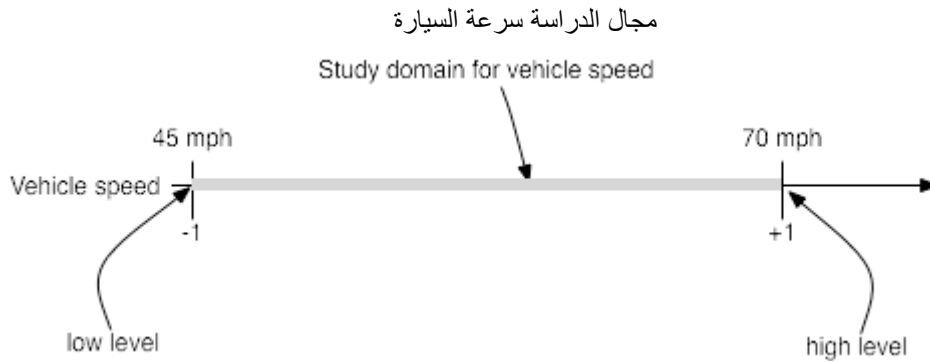
في حال وجود ثلاث عوامل يتم تمثيله بنفس الطريقة السابقة عن طريق محور مدرج وموجه متعامد مع المحورين السابقين، وكذلك الأمر في حال وجود عامل رابع ولكن لا يمكن تمثيله بشكل هندسي، [20].

### **2-6-A مجال العامل Factor Domain**

القيمة التي يأخذها العامل أثناء الاختبار التجريبي تدعى بالمستوي، [20].

The value given to a factor while running an experimental trial is called a level.

كمثال على ذلك: مجال التغيير للسرعة المدروسة بين 45 ميل/ساعة و 80 mph هو قيم جميع السرع المحصورة بين القيم السابقة، المستوي المنخفض low level للعامل يكتب كـ -1 والمستوي الأعظمي يكتب كـ +1 كما هو موضح بالشكل (2-A):



الشكل (2-A) المستويات العظمى والصغرى للعوامل المدروسة

عند دراسة تأثير أي عامل، عادة يتم تقييد تغييره بحددين، إذ يقوم المهندس بتحديد المستويين تبعاً للظاهرة المدروسة، الحد المنخفض lower limit هو المستوي المنخفض low level يرمز له بـ (-1) والحد الأعلى upper limit هو المستوي المرتفع high level ويرمز له بـ (+1)، [20].

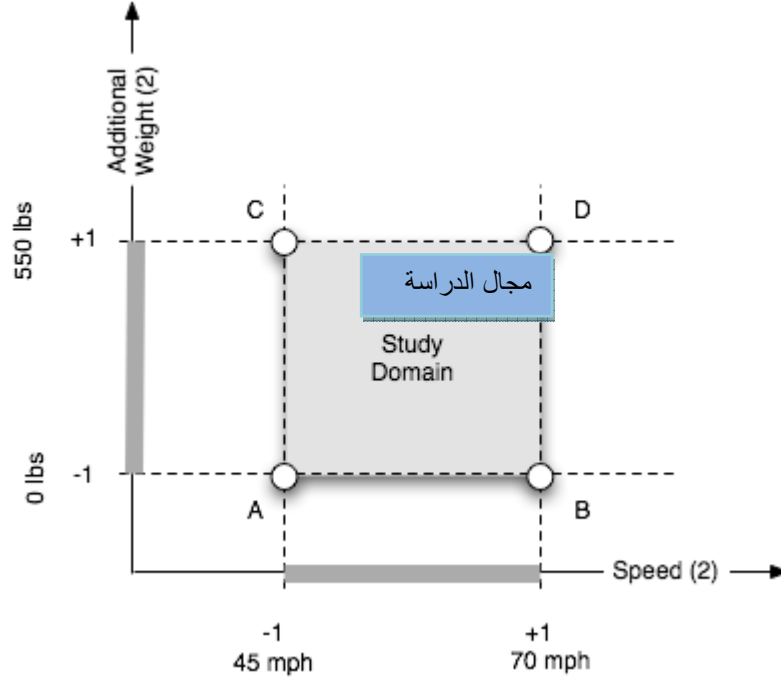
بمعنى آخر يمكن القول أن المجموعة التي تحتوي جميع القيم بين المستوي المنخفض والمستوي المرتفع والتي من الممكن أن يأخذها العامل تسمى مجال تغيير العامل، أو بشكل أبسط مجال العامل، [20].

إذا وجد أكثر من عامل فان كل عامل له مجال تغيير خاص به ، حيث أن العوامل المختلفة تأخذ وحدات قياس مختلفة ففي التصميم التجريبي DOE كل مستوي منخفض يرمز له بـ -1 وكل مستوي مرتفع يرمز له بـ +1، [20].

### 3-6-A مجال الدراسة Study Domain

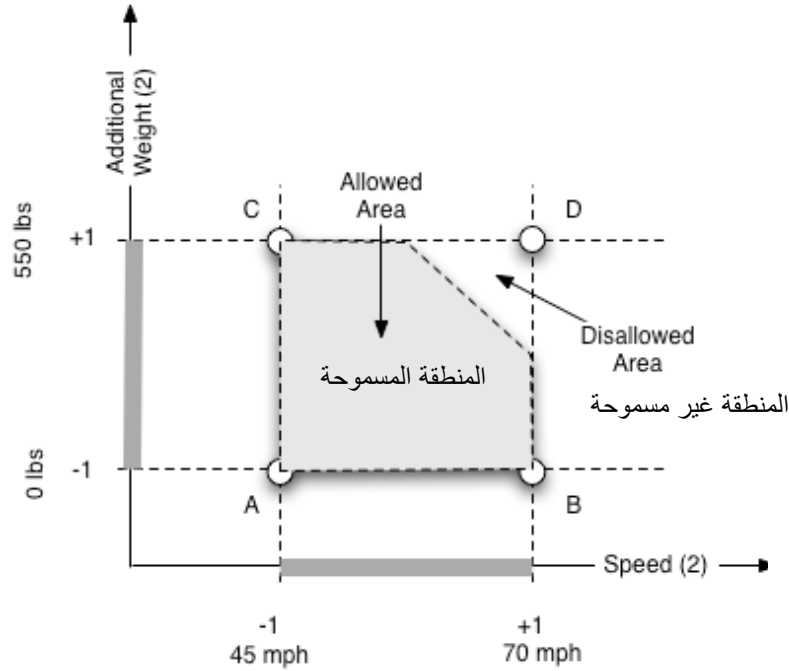
يقوم المحرر باختبار جزء من المجال التجريبي لتنفيذ الدراسة، هذه المنطقة الخاصة من المجال التجريبي تدعى مجال الدراسة، هذا المجال الذي يتم تعريفه بالمستويات المنخفضة والمرتفعة لجميع العوامل المدروسة وللعوامل المقيدة إن وجدت، [20].

إذا فرضنا وجود عامل آخر بالإضافة إلى سرعة العربة وهو الوزن الإضافي حيث يأخذ مستوي منخفض عند القيمة 0 lbs ومستوي مرتفع عند القيمة 550 lbs مجال الدراسة ممثل بجميع النقاط التي يقع الوزن الإضافي بين 0-550 lbs والسرعة بين 45-70 mph مبين بالشكل (3-A):



الشكل (3-A) مجال الدراسة لعاملين

من الممكن أن تكون هنالك قيود constraints على مجال الدراسة، على سبيل المثال قد يكون من المستحيل الوصول إلى سرعة 70 mph مع المزيد من الوزن الإضافي الشكل (4-A) التخفيض المحتمل لمجال الدراسة الأولي، [20].



الشكل (4-A) مجال الدراسة مع وجود قيود على بعض العوامل

#### **4-6-A المتغيرات المركزية والمقيسة CSV Centered and Scaled Variables**

عندما يتم تمثيل المستوي المنخفض لعامل بـ -1 والمستوي المرتفع بـ +1، فإن هنالك تغييران

هامان وهما:

❖ تحرك مركز القياسات: The center of the measurements moves

في مثالنا السابق متوسط المجال  $[-1, 1]$  هو الصفر وهو يوافق قيمة السرعة  $57.5 \text{ mph}$ ، القيمة العددية للصفر الجديد تختلف عن القيمة الأصلية عندما يتم التعبير عنها بوحدات التجربة الأصلية Experimental Units وتسمى عادة وحدات هندسية Engineering Units، [20].

❖ تغير وحدات القياسات: The measurement units change

في المثال السابق قيمة المستوي المخفض لعامل السرعة هي  $45 \text{ mph}$  والمستوي المرتفع هي  $70 \text{ mph}$  وبالتالي هنالك  $25 \text{ mph}$  بين القيمتين السابقتين أي  $25$  مرة وحدة سرعة، [20]. وبالتالي بين  $-1$  و  $1$  هنالك وحدتين جديدتين: الوحدة الجديدة المعرفة بـ  $25 \text{ mph}$  والتي تسمى بالخطوة step

يتضمن هذين التغيرين مقدمة للمتغيرات الجديدة التي ندعوها مركزية و تقييس المتغيرات CSV، المركزية تدل على تغير الأصل، ويشير التقييس إلى تغير الوحدات، وقد اصطلح على تسمية المتغيرات الجديدة بالمتغيرات المشفرة coded variables أو الوحدات المشفرة coded units [20]. تحويل المتغيرات الأصلية A إلى متغيرات مشفرة X (والعكس بالعكس) يتم عن طريق المعادلة التالية حيث  $A_0$  هي القيمة المركزية للوحدات الهندسية، [20]:

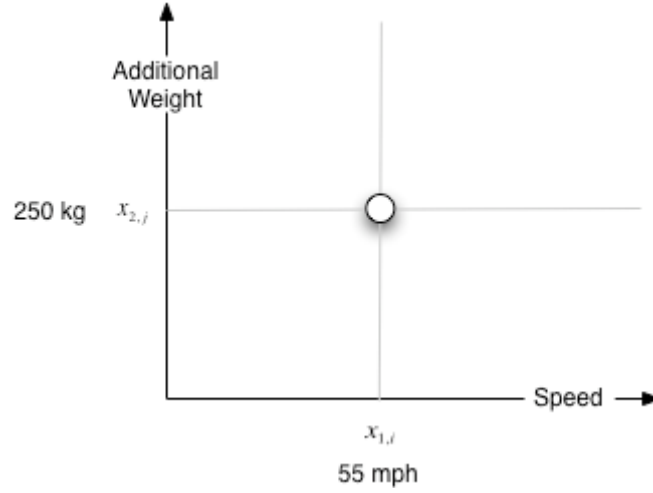
$$x = \frac{A - A_0}{\text{Step}} \quad (2-A)$$

إن استخدام المتغيرات المشفرة أمر شائع في التصميم التجريبي فمن غير الممكن الحصول على النقاط التجريبية عند مستو معين من العوامل من دون استخدامها، تنتج المتغيرات المشفرة من نسبة وحدتين فيزيائيتين لهما نفس الحجم، وبالتالي هي من دون وحدات وغيابها يعود إلى حقيقة أن كل العوامل لها نفس مجال التغير، مما يسمح بالمقارنة المباشرة لتأثير العوامل فيما بينها، إن الفائدة من استخدام الوحدات المشفرة تكمن في قدرتها على تمثيل التصميم التجريبي بنفس الطريقة، بغض النظر عن مجالات الدراسة المختارة وعن العوامل، لذلك يمكن اعتبار طريقة التصميم التجريبي DOE طريقة قابلة للتعميم، [20].

### **5-6-A النقاط التجريبية Experimental Points**

في الفضاء التجريبي يتم تمثيل مستويات العوامل بنقاط تجريبية. كمثال على ذلك إذا كانت لدينا إحدائيات النقاط التجريبية التالية والممثلة لعامل السرعة والوزن الإضافي على التوالي هي:  $x_{2,j} = 250 \text{ kg}$  ،  $x_{1,i} = 55 \text{ mph}$  يمكن تمثيلها كل إحداثية كنقطة تجريبية في الفضاء التجريبي الشكل (5-A):





الشكل (5-A) النقاط التجريبية

عندما يكون عدد العوامل أقل من 3 يمكن بسهولة تمثيل مجال الدراسة، إلا أنه عندما يزيد عدد العوامل عن 3 عندها يتم استخدام التمثيل الجدول والذي ندعوه بالمصفوفة Matrix والذي يعتبر أكثر انتشاراً لأنه يسمح بتمثيل النقاط التجريبية في فضاء متعدد الأبعاد مع أي عدد من الأبعاد، [20].

### **7-A المنهجية العملية للتصميم التجريبي A practical methodology for DOE**

يمكن تقسيم المنهجية العملية للتصميم التجريبي إلى أربع مراحل رئيسية [14]:

#### ❖ مرحلة التخطيط planning phase

وهي تتضمن عدة خطوات:

#### 1- تشخيص المشكلة وصياغتها:

إن الإقرار الواضح والمختصر للمشكلة المدروسة، يجب أن يحتوي على هدف معين قابل للقياس والذي سينتج عنه قيم عملية مفيدة للباحث بخصوص المسألة المدروسة.

#### 2- اختيار الاستجابة:

إن اختيار الاستجابة المناسبة للتجارب هو أمر حاسم بالنسبة للتجارب الهندسية وخصوصاً الصناعية منها، من الممكن أن تكون الاستجابة متغيرة (الطول-القطر-المقاومة) أو موصوفة (جيد أو سيء- نعم أو لا)، على المجرّب أن يعرف نظام القياسات قبل القيام بالتجربة وذلك لمعرفة ما هو القياس؟ وأين يتم القياس؟ وغيرها...، كما من الضروري أن يتم التأكد من أن نظام القياسات ممكن وثابت [14].

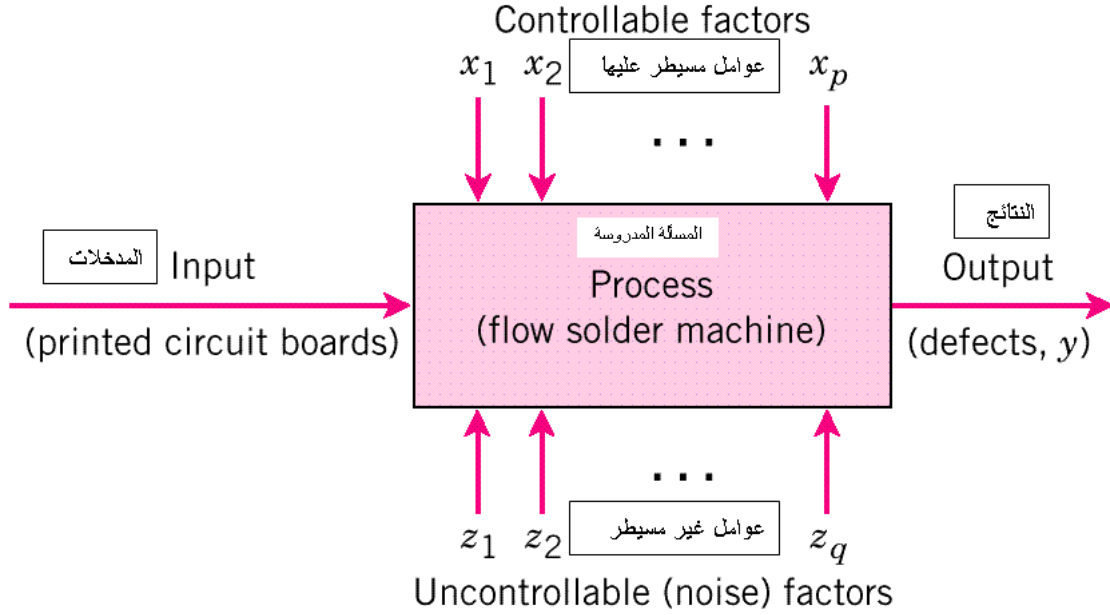
#### 3- اختيار متغيرات المسألة المدروسة أو بارمترات التصميم:

وهي تعتبر خطوة هامة من التصميم التجريبي، إذا تم وضع المتغيرات الهامة خارج التجربة، عندها ستكون النتائج غير مفيدة وغير دقيقة، لذلك من المهم أولاً القيام بتجربة فاحصة في المرحلة الأولى لأي تحقيق تجريبي لمعرفة بارمترات التصميم أو متغيرات المشكلة، واحدة من الطرق لتمييز متغيرات العملية المحتملة هي استخدام المعلومات الهندسية عن المشكلة، أو البيانات التاريخية، تحليل التأثير والسبب، [14].

#### 4- تصنيف متغيرات العملية:

بعد تعريف متغيرات المسألة، الخطوة التالية تكون بتصنيف تلك المتغيرات إلى متغيرات مسيطر عليها وأخرى غير مسيطر عليها، يمكن لهذه المتغيرات (غير المسيطر عليها) أن يكون لها تأثير كبير على صلاحية التجربة، إلا أن هذا التأثير يمكن تخفيضه بتطبيق المبادئ الأساسية للتصميم التجريبي مثل النسخ المتماثل والحظر والتوزيع العشوائي، [14].

الشكل (1-6) : يبين المتغيرات المسيطر عليها وغير مسيطر عليها وتأثيرها على المسألة المدروسة.



الشكل (6-A) العوامل المسيطر عليها وغير مسيطر عليها

5- تحديد مستويات العوامل:

عدد المستويات يعتمد على عدد المتغيرات للعملية التي ستطبق عليها التجربة، وفيما إذا كانت تلك المتغيرات نوعية (نوع المادة، نوع المحفز، ...) أو كانت كمية (درجة الحرارة، السرعة، الضغط، ...)، عندما تكون المتغيرات نوعية عندها ندرس مستويين وعندما تكون المتغيرات كمية نحتاج إلى أكثر من مستويين للدراسة، [14].

6- تحديد تداخلات الاهتمام:

إن ترجمة نتائج التجارب بشكل فعال لا بد من استخدام التداخل بين العوامل المدروسة، وعادة ما يتم التعامل مع التداخل بين العوامل على أنه تأثير مثل تأثير متغير أو عامل شرط أن لا يتم اعتباره من المدخلات فهو على عكس العوامل المؤثرة على التجربة لا يتم إدخال التداخلات في شروط التجربة، [14]، يمكن حساب عدد التداخلات الثنائية من خلال المعادلة التالية:

$$N = \frac{n \otimes (n-1)}{2} \quad (3-A)$$

حيث n عدد العوامل

في حال كان  $n=4$  عدد التداخلات الثنائية بين العوامل هو 6.

#### ❖ مرحلة التصميم Designing phase

في هذه المرحلة يتم اختيار طريقة التصميم التجريبي المناسبة للتجربة، وذلك باستخدام التصميم الإحصائي الكلاسيكي أو التصاميم العاملية الكاملة أو الجزئية وغيرها من طرق التصميم التجريبي. إن حجم التجربة يعتمد على عدد العوامل والتداخلات المدروسة، عدد المستويات لكل عامل والميزانية، كما من الضروري أن تكون مصفوفة التصميم جاهزة قبل البدء بالتجربة فهي تكشف مكان عوامل التصميم عند المستويات المختلفة، [14].

#### ❖ مرحلة التحري Conducting phase

في هذه المرحلة تكون التجربة المخططة قد أنجزت وتم تقييم النتائج

#### ❖ مرحلة التحليل Analysis Phase

وهي مرحلة تحليل وترجمة النتائج لاشتقاق الاستنتاجات الصحيحة، فيما يلي الأهداف المحتملة المنجزة من هذه المرحلة، [14]:

- 1- تحديد بارامترات التصميم أو متغيرات المسألة التي تؤثر على أداء العملية الأساسي.
- 2- تحديد بارامترات التصميم أو متغيرات المسألة التي تؤثر على تغيير الأداء.
- 3- تحديد المستويات الأعظمية لبارامترات التصميم التي تعطي الأداء الأعظمي.

### **8-A المخططات التجريبية العاملية Factorial Experiment Plans**

تعتبر المخططات التجريبية العاملية واحدة من أكثر طرق التصميم التجريبي وجوداً وانتشاراً والتي تستخدم التقنيات الإحصائية، فهي تعتبر طريقة لتخطيط ولإجراء المنظم للتجارب، ففيها تتغير عوامل التصميم بشكل منظم لملاحظة التغيرات في الاستجابات الناتجة عن المسألة، [24]. إذ يتم حساب عدد التجارب في طريقة المخططات التجريبية الكاملة باستخدام المعادلة التالية، [22]:

$$N = L^K \quad (3-A)$$

حيث L عدد المستويات لكل عامل

K عدد العوامل

في حال كان عدد المستويات المدروسة لكل عامل هو 2 وكان عدد العوامل هو 2 وبالتالي عدد

$$N = 2^2 = 4 \text{ التجارب}$$

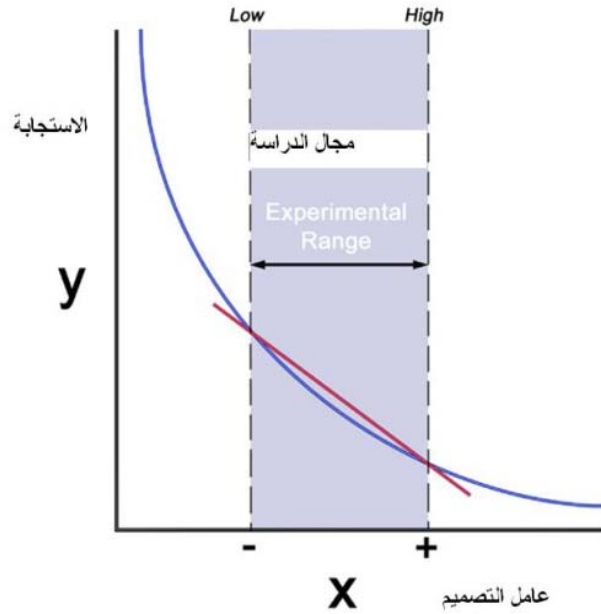
وفي حال 3 عوامل بنفس الطريقة نحسب عدد التجارب  $N = 2^3 = 8$

على كل فان التصميم الإحصائي للتجارب يعتمد على دمج عدة عوامل مع بعضها البعض وبنفس الوقت ضمن مصفوفة التصميم والتي ندعوها بمصفوفة التصميم المشفرة Coded design matrix [14],[21].

كمثال على دمج عاملين أو ثلاث على مستويين في الفضاء التجريبي الموضح بالشكل (7-A) باستخدام المخططات التجريبية العاملية مبين فيما يلي:

## Linear Approximation in Design Space

التقريب الخطي في المجال التجريبي



الشكل (7-A) مجال الدراسة

مجموعات Combinations التصميم لعاملين على مستويين هما [21]:

$2^2$		$2^3$		
$X_1$	$X_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
-	-	-	-	-
+	-	+	-	-
-	+	-	+	-
+	+	+	+	-
4 combinations that will be run		-	-	+
		+	-	+
		-	+	+
		+	+	+
		8 combinations that will be run		

الشكل (8-A) مجموعات مستويات عوامل التصميم

كما أن مصفوفة التصميم المشفرة الكاملة لثلاث عوامل تصميم على مستويين مبينة بالشكل (9-A):  
واحدة من أهم أهداف التصميم التجريبي DOE هي تحديد ما إذا كان هنالك تغير هام في الاستجابة  
عبر مستويات المعالجة Levels of Treatment، حيث أن التأثير Effect: تغير في الاستجابة تبعاً  
لتغير مستوى العامل، [19].

An Effect is a change in the response due to a change in a factor level

هنالك عدة أنواع للتأثيرات منها :

التأثير الثابت Fixed Effect عندها سيكون التحليل سهلاً وطبيعياً والبيانات الشاذة تكون أقل ما يمكن وفيها يكون مخطط تأثير العامل موازياً لمحور المستويات الممثلة للعامل، [19].  
التأثير العشوائي Random Effect عندما تكون مستويات العوامل المدروسة تمثل اختيار عشوائي من مستويات أكبر وهي تمثل عينة الأفراد أو الشروط القابلة للتبادل، [19].

Design Matrix						
2 <sup>3</sup> Experiment						
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
-	-	-	+	+	+	-
+	-	-	-	-	+	+
-	+	-	-	+	-	+
+	+	-	+	-	-	-
-	-	+	+	-	-	+
+	-	+	-	+	-	-
-	+	+	-	-	+	-
+	+	+	+	+	+	+

◀ Design Matrix ▶

Full Factorial Design

الشكل (9-A) مصفوفة التصميم المشفرة الكاملة

لحساب مصفوفة التأثير لعاملين كانت قيم الاستجابة لهما هي:

N	X1	X2	Y
1	-	-	14
2	+	-	5
3	-	+	3
4	+	+	8

نوجد أولاً المتوسط العام لجميع قيم الاستجابة [23]:

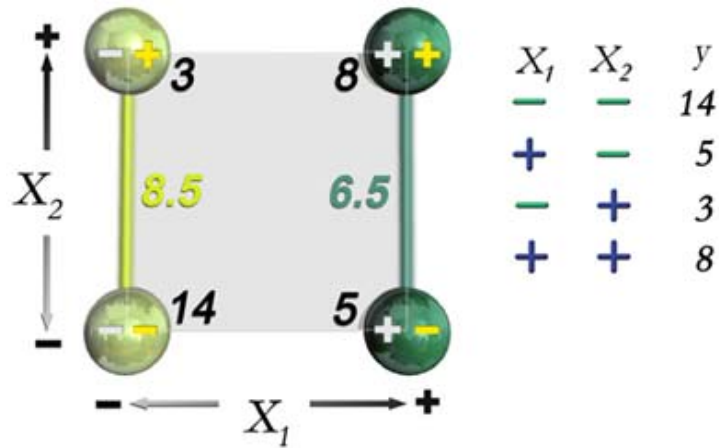
$$M_g = \frac{\sum y_i}{N} \quad (4-A)$$

$$M_g = \frac{\sum y_i}{N} = \frac{14+5+3+8}{4} = 7.5 \quad \text{وبالتالي:}$$

نحسب تأثير كل عامل من عوامل التصميم كالتالي، حيث يعرف تأثير العامل X في المستوي i هو متوسط قيم الاستجابة للعامل X عند المستوي i منقوصاً منه المتوسط العام لقيم الاستجابة، [23]:

$$E_{xi} = (M_g \text{ العام}) - (\text{متوسط القيم للعامل X عند مستوي معين}) \quad (5-A)$$

وبالتالي يجب إيجاد مصفوفة المتوسطات



$$X = -1: \frac{14+3}{2} = 8.5, \quad E_{x=-1} = 8.5 - 7.5 = 1$$

$$X = +1: \frac{5+8}{2} = 6.5, \quad E_{x=+1} = 6.5 - 7.5 = -1$$

يجب ملاحظة أن مجموع تأثير المستويات لعامل ما يساوي الصفر [23]:

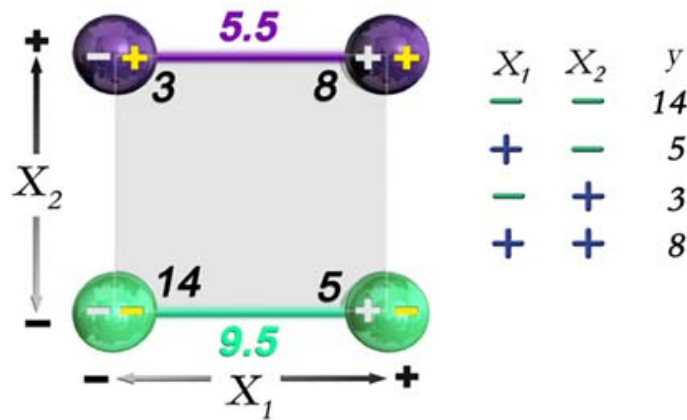
$$E_{x=+1} + E_{x=-1} = 0 \quad (6-A)$$

مصفوفة المتوسطات هي:

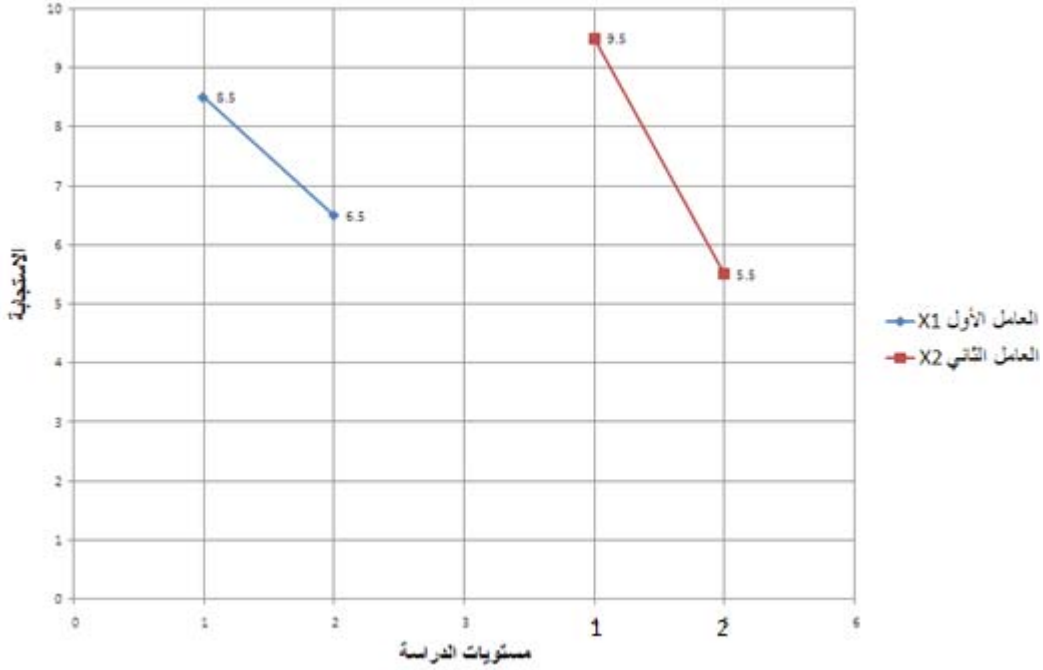
$M_{xi}$	$X_1$	$X_2$
-1	8.5	9.5
1	6.5	5.5

مصفوفة التأثير:

$E_{xi}$	$X_1$	$X_2$
-1	1	2
1	-1	-2

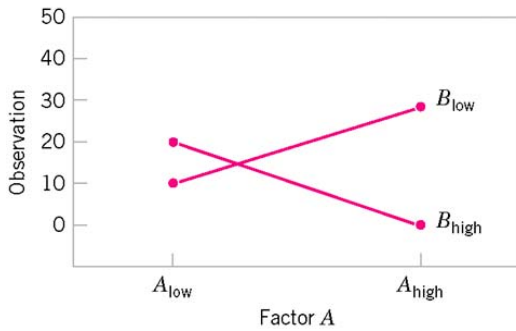


الشكل (10-A) التمثيل التخطيطي لتأثير كل عامل من عوامل التصميم.

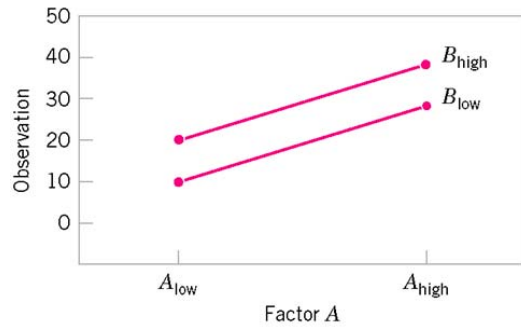


الشكل (10-A) مخطط التأثيرات الوسطية للعوامل المدروسة

هنالك اعتبار آخر ضروري يجب ملاحظته وهو أن تأثير عامل معين على الاستجابة يختلف بحسب تغير مستويات العوامل الأخرى وهذا ما اصطلح على تسميته تداخل Interaction العوامل، ولتحديد التداخل بين العوامل يتم الاستعانة بالمخططات البيانية والتي تسمى مخططات التداخل interaction Graphs فمن خلالها يتم تحديد فإذا كانت الخطوط متوازية هذا يدل على عدم وجود تداخل بين العوامل المدروسة، بمعنى آخر هذا يدل على أن التغير في الاستجابة بين المستوي المنخفض والمستوي المرتفع للعامل الأول لا يعتمد على مستوي العامل الآخر، وفي حال كانت الخطوط غير متوازية هذا يدل على وجود تداخل بين العوامل، [18],[14] الشكل (1-12) يوضح حالة عدم وجود تداخل وحالة وجود تداخل بين عاملين.



حالة وجود تداخل بين عاملين



حالة عدم وجود تداخل بين عاملين

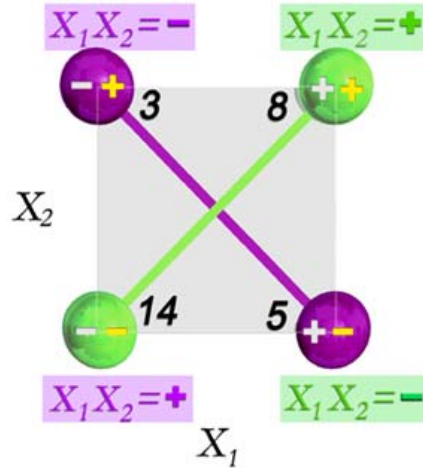
الشكل (11-A) حالات التداخل بين العوامل

أما حساب التداخل بين العوامل باستخدام طريقة المخططات التجريبية يتم باستخدام المعادلة العامة لحساب التداخل، [23]، فالتداخل بين عاملين يساوي إلى متوسط قيم الاستجابة للعامل A عند المستوي I

وقيم العامل الثاني B عند المستوي j منقوصاً منها قيمة المتوسط العام لقيم الاستجابة وتأثير العامل A عند المستوي i وتأثير العامل B عند المستوي j:

$$I_{AiBj} = (متوسط استجابة العامل) - M_g - E_{Ai} - E_{Bj} \quad (7-A)$$

وبالتالي لحساب التداخل للعاملين السابقين:



نحسب المتوسط لعاملين عند مستوي +1 :

$$M_{(x_1 x_2 = 1)} = 14$$

$$I_{(x_1 x_2 = 1)} = 14 - 7.5 - 1 - 2 = 3.5$$

نحسب المتوسط لعاملين عند مستوي -1 :

$$M_{(x_1 x_2 = -1)} = 3$$

$$I_{(x_1 x_2 = -1)} = 3 - 7.5 - (1) - (-2) = -3.5$$

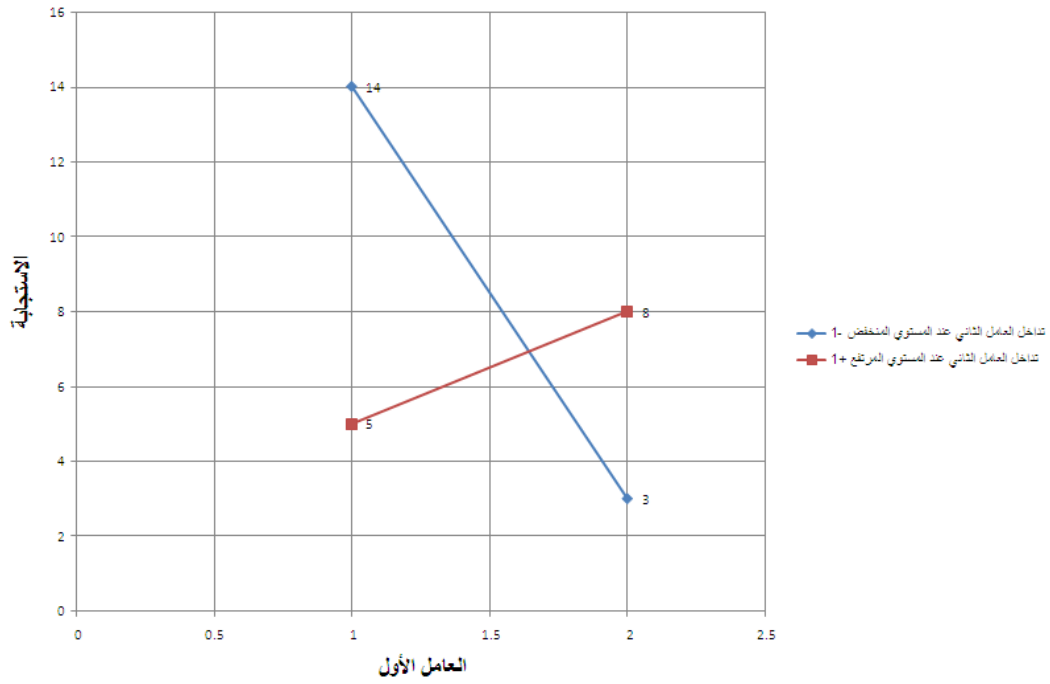
وبالتالي مصفوفة التداخلات بالشكل:

		$x_2$	
		-	+
$x_1$	$Mx_{i, x_j}$	-	+
	-		14
+		5	8

أما مخططات التداخل للعاملين فقد كانت:

من المخططات نلاحظ وجود تداخل بين العاملين المدروسين.





الشكل (12-A) مخططات التداخل بين العاملين

يمكن حساب التداخل بين العاملين كما يلي:

$Ix_i, x_j$	-	+
-	3.5	-3.5
+	-3.5	3.5

والتداخل محقق للمعادلة [19]

$$\begin{array}{ccc}
 X_1 & X_2 & X_1 X_2 \\
 - & - & = + \\
 + & - & = - \\
 - & + & = - \\
 + & + & = +
 \end{array}$$

Algebra  
 $-1 \times -1 = +1$

## المراجع

- 1- Department Of The Army U.s. Army Corps of Engineers (2003) "Engineering and Design Slope Stability"., Appendix C.
- 2- Slope stability with Rocscience software (2003) article prepared for rocnews.
- 3-John Karhan., Stress and deformation modeling with SIGMA/W., User Manuals., 2004
- 4- S.pietrzczak &G.n.pande Numerical models in geomechanics, 1997
- 5- Application of the finite element method to slope stability article prepared for rocnews , Rocscience Inc. Toronto, 2001-2004.
- 5- Kenneth H. Huebner.& Donald L. Dewhirst.& Douglas E. Smith .&Ted G. Byrom.,(2001).,The Finite Element Method for Engineers,4th Edition.,Chapter1.,
- 6- Yijun Liu.,(1997-2003).-" Lecture Notes: Introduction to the Finite Element Method" .,
- 7- Timothy M. Whalen;(2004) Section 3: Implementation of Finite Element Analysis – the Constant Strain Triangle, PP.2-3
- 8- Amit H. Varma.,(2007)., Finite Element Modeling and Analysis, CE 595: Course Part 2, PP.2-16.
- 9- A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique. ,( 2004).,article prepared for rocnews.
- 10- Y.M. Cheng a.& T. Lansivaara b.& W.B. Wei a., Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods., Computers and Geotechnics 34 (2007) 137–150., article prepared for Science Direct.
- 11- Application of the Finite Element Method to Slope Stability.,(2001-2004)., article prepared for rocnews.
- 12- Rocscience inc., (2009). Phase2 version7, user manuals.
- 13- Rocscience inc., (2009). Slide version5.0, user manuals
- 14-Jiju Antony.,(October 2003).,"Design of Experiments for Engineers and Scientists"., ISBN: 0750647094.,
- 15- SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.,2005.," JMP Design of Experiments, Release 6".,ISBN 1-59047-816-9
- 16- Dr. Leonard M. Lye.,(2001).," Design and Analysis of Multi-Factored Experiments Engineering 9516" .,pp.5-26.

- 17- Atina Dunlap Brooks.,(2005)., "Basic Statistical Concepts CRSC - SAMSI Workshop"pp.2-3.
- 18- Dr. Srinivas R. Chakravarthy .,(1999).," MATH408: Probability & Statistics Summer 1999 WEEKS 10 & 11".,pp10-35
- 19- Concepts of Experimental Design., (2005)., Design Institute for Six Sigma., article prepared for sas.
- 20- (2007).,"Gaining Knowledge with Design of Experiments"
- 21- Vijay Nair., "Fractional Factorial Designs: A Tutorial" .,pp5-17., vnn@umich.edu.
- 22- Daniel A. Menasce.,(2001).," Design of Experiments: Factorial Designs".,pp2-3.
- 23- Maurice Pillet.,(1999).,"Les Plans d experiences Par LA METHODE Taguci".
- 24- Experiential Learning Of Design Of Experiments Using A Virtual CVD Reactor .,(2006)., Milo Koretsky., Shoichi Kimura., Connelly Barnes., Danielle Amatore., Derek Meyers-Graham., article prepared for American Society for Engineering Education.
- 25- Reddy J.N. (1984)., "An introduction to the finite element method" McGraw-hill book company.

## **Abstract:**

The problem of slope stability is considered one of main issues that faces the engineer in soil mechanics. This problem gain the interest of geotechnical engineering and researchers since twentieth of last century, who presented several methods of slope stability analysis, These methods, in general, require the soil mass to be divided into slices. The directions of the forces acting on each slice in the slope are assumed. This assumption is a key role in distinguishing one limit equilibrium method from another.

But in Shear Strength Reduction (SSR) for analyzing slope stability which depends on analyzing stability of studding slope by using the finite element method that depends on analyzing stresses and strains that passes the soil mass and by reduce the shear strength through cohesion and friction angle until the slope achieve to a stage that couldn't be able to analyze its stability by using finite element the displacement will be large in the slope and the slope will be collapse consequently, we are going to get the Factor Of Safety FOS of the studding slope without need to define the shape or location of sliding surface slice side forces and their directions.

In this research" **Analysis of Slope Stability Using Shear Strength Reduction SSR**" it has been discussed the homogeneous slope from two sides:

Firstly: from designing consideration: studying the effect of the ratio H/L on the FOS by using (SSR).

Secondly: from mechanical consideration: we change the five material properties. These properties are the friction angle  $\phi$ , cohesion C, Young's modulus E, Poisson's ratio  $\nu$  and unit weight of soil  $\gamma$ , by using (SSR) .

A Mathematical Model has been developed for calculating the FOS for homogenous slope that influenced factors on the FOS are changed by using the Design Of Experiment Method DOE, which depends on changing the values of designing factors by using the studding levels to know how effect each factor of these designing factor on FOS then studding the interaction between two or more designing factors.

Aleppo University  
Faculty Of Civil Engineering  
Department Of Geotechnical Engineering



# **Analysis of Slope Stability Using Shear Strength Reduction SSR**

Thesis for Degree MSc in Geotechnical Engineering  
Submitted by  
Eng. Zahra Atash Ogeli

**1432**  
**2011**

Aleppo University  
Faculty Of Civil Engineering  
Department Of Geotechnical Engineering



# **Analysis of Slope Stability Using Shear Strength Reduction SSR**

Thesis for Degree MSc in Geotechnical Engineering  
Submitted by  
Eng. Zahra Atash Ogeli

Supervisor

**Dr. Nawar Kadan**  
Dept. of Geotechnical Engineering  
Faculty of Civil Engineering  
Aleppo University

Participation

**Dr. Alaa Kourdey**  
Dept. of Geotechnical Engineering  
Faculty of Civil Engineering,  
Aleppo University

1432  
2011

## **Declaration**

I hereby declare that this work:

**"Analysis of Slope Stability Using Shear Strength Reduction SSR"**

Has neither, been accepted previously for any degree, nor it is being presented for any other degree.

Candidate

Eng. Zahra Atash Ogeli

### **Certificate**

It is hereby that the work described in thesis is the result of the author's own investigation under the supervision of **Dr.Nawar Kadan, Dr. Alaa Kourdey** ,in the Dept. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Aleppo University

Candidate

**Eng. Zahra Atash Ogeli**

Supervisor

**Dr.Nawar Kadan**

Participation

**Dr. Alaa Kourdey**