

دراسة عددية لظاهرة التسييل في الترب الرملية المفككة المشبعة تحت تأثير الزلازل باستخدام برنامج FLAC3D

د. رامي العبد*
*

د. إياد سليطين**
**

بشرى عبد الوهاب***

تاريخ الإيداع 8 / 3 / 2021. قُبل للنشر في 6 / 9 / 2021

□ ملخص □

توضّح هذه الدراسة كيفية التنبؤ بقابلية الترب المفككة المشبعة للتسييل من خلال حساب ضغط الماء المسامي المتولد عن الزلازل والاجهادات الفعالة ومقارنة هذه الاجهادات مع قيم ضغط الماء المسامي حيث أن التربة تتسييل عندما يصبح ضغط الماء المسامي مساوٍ لقيمة الإجهاد الفعال أو أكبر منه وعندما تنعدم الإجهادات الفعالة تكون التربة قد تسيلت بشكل تام وفقدت مقاومتها على القص.

تتضمن الدراسة إجراء دراسة بارامترية للعوامل المؤثرة على التسييل(خواص التربة والزلازل) باستخدام برنامج FLAC3D ، وتمت مناقشة وتحليل النتائج التي تم الوصول إليها ووضع بعض الاستنتاجات والتوصيات الهامة.

الكلمات المفتاحية: تسييل التربة، الترب المفككة المشبعة، الزلازل، برنامج FLAC3D.

*مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

ramihashimalabda@tishreen.edu.sy

** مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية- كلية الهندسة المدنية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية. iyadsliteen@tishreen.edu.sy

***طالبة دراسات عليا (ماجستير)-قسم الهندسة الجيوتكنيكية-كلية الهندسة المدنية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية

Boushra.a.9@gmail.com

Numerical Study of Saturated Loose Sand Liquefaction Under Seismic Effect

Dr. Rami Alabdeh *

Dr. Iyad Slitten**

Boushra Abdulwahab***

(Received 8 / 3 / 2021. Accepted 6 / 9 / 2021)

□ ABSTRACT □

This study shows how to predict the predictability of saturated disjointed soils by calculating the pore water pressure generated by the earthquake and effective stresses and comparing these stresses with the values of porous water pressure, where the soil is liquefied when the pore water pressure becomes equal to or greater than the value of effective stress and when effective stress is non-existent, the soil is completely liquefied and lost its resistance to the sternum.

The study includes a parametric study of the factors affecting the depcardant (soil properties and earthquake) using the FLAC3D program, and discussed and analyzed the findings reached and developed some important conclusions and recommendations.

Keywords: Liquefaction, Saturated loose sand, Earthquakes, FLAC3D.

* Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. ramihashimalabda@tishreen.edu.sy

**Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. iyadsliten@tishreen.edu.sy

***Postgraduate Student (Master), Department of Geotecnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. boushra.a.9@gmail.com

مقدمة:

تعتبر ظاهرة تسيل التربة من الظواهر المعقدة الدراسة حيث أنه من الصعب التنبؤ المسبق بتسيل الترب الرملية المشبعة عند حدوث الزلازل، بالإضافة إلى أن هذه الظاهرة ترتبط بالعديد من العوامل التي تؤثر في قابلية التربة للتسيل من خواص للتربة والزلازل والتأثير المتبادل بين هذه الخواص مما جعل هذه الظاهرة ذات اهتمام لدى الباحثين في مجال ديناميك التربة.

عند حدوث الزلازل تتعرض الترب الرملية أو الرملية السيلتية المشبعة الى قوى متناوبة تؤدي الى ارتصاص لحبيباتها الصلبة، أي حدوث انضغاط حجمي كبير في فترة زمنية قصيرة مما يسبب تزايداً في ضغط الماء المسامي داخل التربة، ومع استمرار الاهتزاز خلال الزلازل يتزايد مقدار هذا الضغط داخل المسامات فتتحول الاجهادات جزئياً من حبيبات التربة الى الماء، ونتيجة لذلك تتخفف مقاومة التربة على القص إلى أن تنعدم الإجهادات الفعالة بالكلية وفي هذه المرحلة تعد التربة تربة متسيلة تسلك سلوك السوائل اللزجة التي لا تستطيع تحمل أي حمولات مطبقة عليها فيحصل الهبوط. تم في هذا البحث وضع موديل عددي بسيط وفعال قادر على نمذجة تسيل الترب الرملية المشبعة وتمت معايرته على نتائج دراسات تجريبية لأبحاث سابقة ووجدنا تقارباً جيداً بين النتائج العددية والتجريبية، نتمكن من خلال هذه النمذجة من التنبؤ المسبق بتربة موقع معين عند تعرضه لاهتزازات زلزالية متوقعة وبالتالي تلافي الكوارث والأضرار البشرية والاقتصادية المحتملة وكذلك تم إجراء دراسة بارامترية لتأثير كل من خواص التربة والحركة الزلزالية على قابلية التسيل.

أهمية البحث وأهدافه:**1- أهمية البحث:**

تكمن أهمية البحث في وضع موديل عددي بسيط وفعال قادر على نمذجة تسيل الترب الرملية المشبعة، حيث يمكن استخدام الموديل للتنبؤ مسبقاً بتسيل تربة موقع معين عند تعرضه لاهتزازات زلزالية متوقعة وبالتالي تلافي الكوارث والأضرار البشرية والاقتصادية المحتملة وكذلك إمكانية إجراء دراسة بارامترية (تربة+حركة زلزالية) لتسيل التربة.

2- الهدف من البحث:

يهدف هذا البحث إلى إجراء دراسة عددية لقابلية الترب للتسيل تحت تأثير الزلازل باستخدام برنامج (FLAC3D) وهو برنامج للنمذجة العددية واسع الاستخدام لحل المشاكل الجيوتكنيكية بطريقة ثلاثية الأبعاد. يعتمد البرنامج على منهجية الفروقات المحدودة التي تساعد في نمذجة المشاكل المعقدة كظاهرة تسيل التربة حيث يقوم بتوليد ضغط الماء المسامي الديناميكي المتولد عن الزلازل وبالتالي إمكانية التنبؤ بالعمق الاعظمي للتسيل وحدود المنطقة المتسيلة بالطرق المرجعية التي ستوضح في هذه الدراسة

طرائق البحث ومواده:

- 1- النموذج الرياضي: يتضمن وضع الموديل العددي المناسب للدراسة ومن ثم معايرته على نتائج دراسات حقلية سيتم استخدام برنامج (FLAC3D)
- 2- الدراسة العددية: تتضمن عرضاً لنتائج الدراسة العددية وتحليلها ومناقشتها
- 3- الدراسة البارامترية للعوامل المؤثرة على التسيل (خواص التربة والحركة الزلزالية)

النتائج والمناقشة:

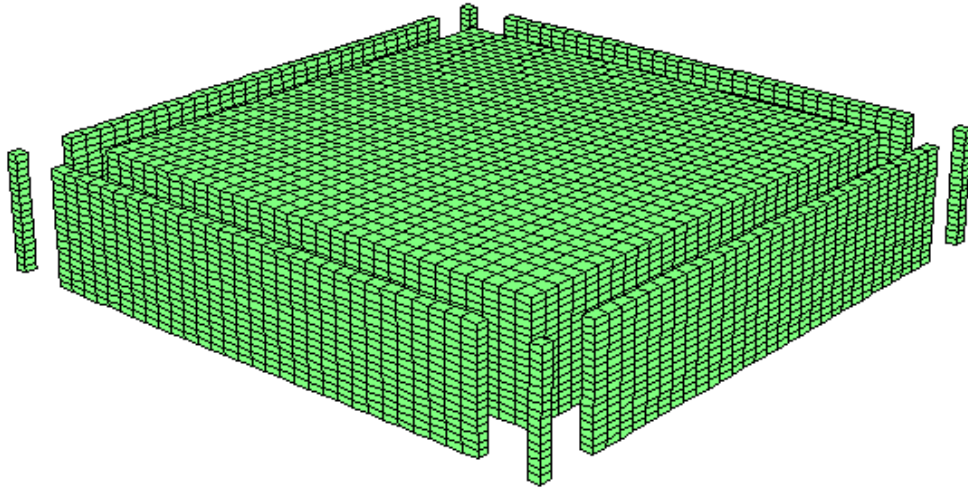
1- البرامج المستخدمة:

- برنامج **FLAC3D** : وهو برنامج يعتمد على طريقة الفروقات المحدودة، إذ يتم الاهتمام بالتأثير الزلزالي كحركة ديناميكية أفقية إجمالية على طول قاعدة الموديل، يتم تعريف الموديل من خلال تحديد مايلي:
- الأبعاد الهندسية للموديل
 - طبقات التربة وخواصها وفيه يتم التعريف الكامل لخواص كل طبقة من طبقات التربة.
 - معاملات تخامد: تم ادخال معاملات تخامد ريليه من خلال التحديد المباشر.
 - الحدث الزلزالي عند القاعدة. إما عن طريق إدخال السجل الزلزالي او عن طريق إدخال الحركة الزلزالية كحركة جيبية.

أما نتائج البرنامج فهي بشكل رئيسي سجلات الاستجابة الزمنية عند اعماق محددة مثل (السجل الزمني للتسارع، السجل الزمني للانتقالات، السجل الزمني لضغط الماء المسامي.....الخ)

2- تقديم الموديل العددي وبرنامج الحساب:

تم تقسيم التربة في الموديل لشبكة من العناصر المربعة، أبعاد الموديل $(30*30*6.8)m$ يبين الشكل (1) تقسيمات الموديل العددي والمدرّوس والشروط الطرفية المستخدمة free field Boundary



الشكل (1) تقسيمات الموديل و الشروط الطرفية المستخدمة في الموديل (free field Boundary)

في الحساب الديناميكي سيتم الحساب باعتبار:

- ✓ سلوك التربة: مرن - لدن
- ✓ قانون سلوك التربة: مور كولمب
- ✓ الشروط الطرفية المدخلة هي free field Boundary

تم تحقيق الموديل على القياسات الحقلية لضغط الماء المسامي خلال الزلزال الذي حصل في كاليفورنيا

(the Superstition Hills earthquake, California, 1987).

تم التعبير عن السجل الزمني للزلازل بقوة تحريض توافقية نعب عنها بالمركبة الأفقية للتسارع حيث تعطى بالعلاقة:

$$a(t) = a_0 \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi f$$

حيث: a_0 التسارع الزلزالي الأعظمي

ω التردد الزاوي للاهتزاز.

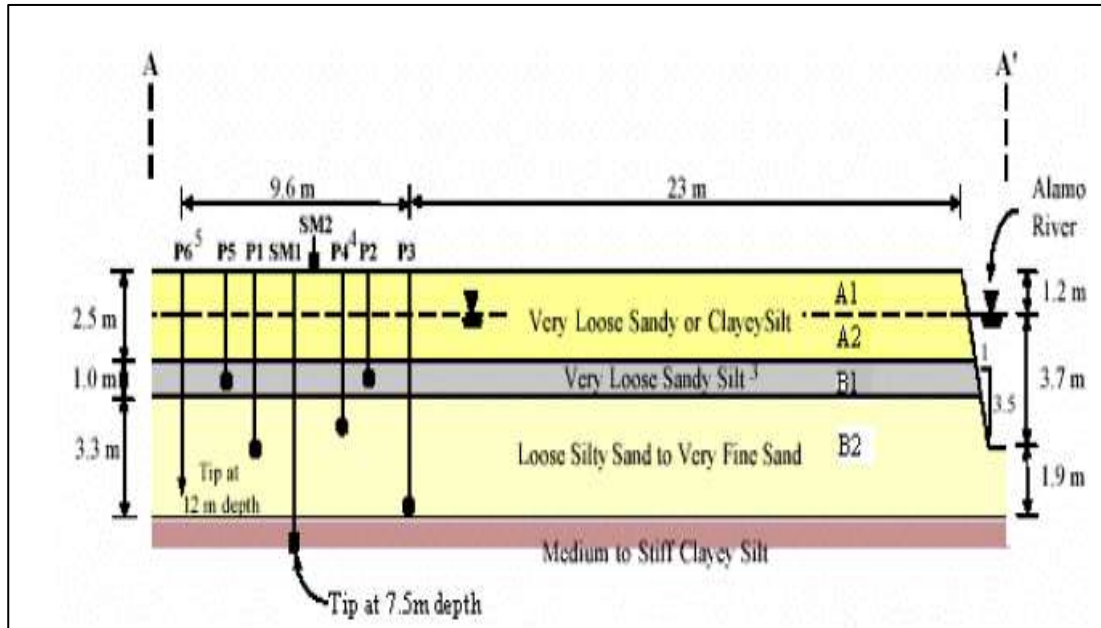
f : تردد الاهتزاز (Hz)

3- تحقيق الموديل العددي على القياسات الحقلية:

1.3. المعطيات الحقلية:

(a) المقطع الجيوتكنيكي المدروس موضح في الشكل (2) حيث أن طبقات التربة في الموقع تتوضع كما يلي من الأعلى إلى الأسفل:

- الطبقة الأولى (Layer 1): هي تربة رملية مفككة سماكتها 2.5m
- الطبقة الثانية (Layer 2): هي تربة من الرمل السيلتي سماكتها 1m
- الطبقة الثالثة (Layer 3): هي تربة من الرمل السيلتي المفكك سماكتها 3.3m
- الطبقة الرابعة (Layer 4): طبقة ممتدة من السيلت الغضاري
- منسوب المياه الجوفية يقع على عمق 1.2m من سطح الأرض.



الشكل (2) المقطع الجيوتكنيكي المدروس [4]

(b) خواص التربة في الموقع موضحة في الجدول (1): معامل يونغ E ، الكتلة الحجمية ρ ، معامل المسامية

n ، معامل القص للتربة G ، معامل نفاذية التربة

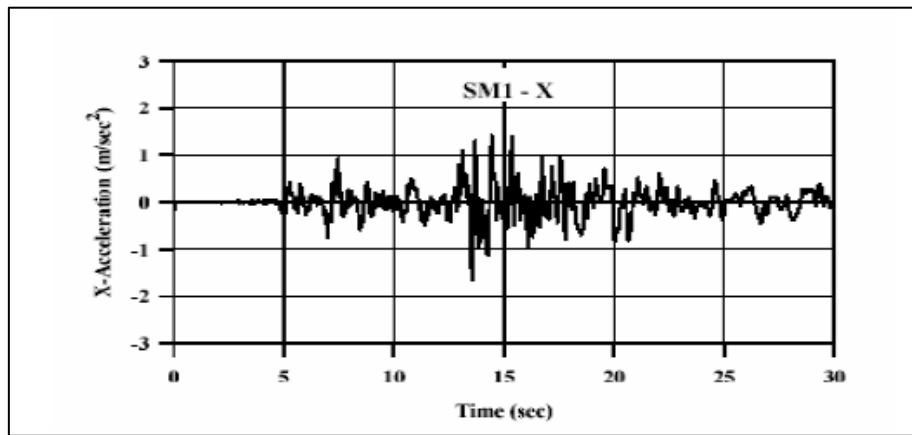
الجدول (1) خواص التربة في الموقع [4]

Soil type	Depth (m)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ψ (°)	k (m/s)	E ($\times 10^4$ kPa)
Sandy silt	0-1.2 m	28	0	0	5×10^{-7}	3.77
Sandy silt	1.2-2.5 m	28	0	0	5×10^{-7}	6.032
Sandy silt	2.5-3.5 m	28	0	0	5×10^{-7}	7.13
Silty sand to fine sand	3.5-6.8 m	33	0	0	2.1×10^{-6}	6.25
Clayey silt to silty clay	6.8-7.5 m	28	48	0	1×10^{-8}	8.52

ϕ' = Effective friction angle
 c' = Effective cohesion
 ψ = Dilation angle
 k = Permeability
 E = Elastic modulus

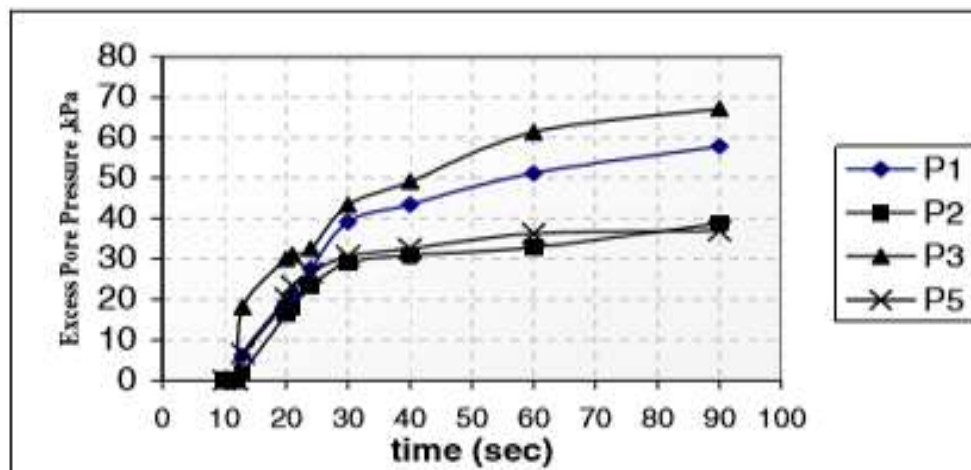
(c) السجل الزمني للزلازل كاليفورنيا:

يبين الشكل (3) السجل الزمني للزلازل حيث أن شدة الزلازل $Mw=6.7$ ومدة الزلازل 30 ثانية والتردد $f = 5Hz$



الشكل (3) السجل الزمني للزلازل كاليفورنيا (the Superstition Hills earthquake, California, 24th of Nov. 1987). [4]

(d) القيم المقاسة حقلياً لضغط الماء المسامي في النقاط $P1, P2, P3, P5$ موضحة في الشكل (4)



الشكل (4) قيم ضغط الماء المسامي المقاسة حقلياً [4]

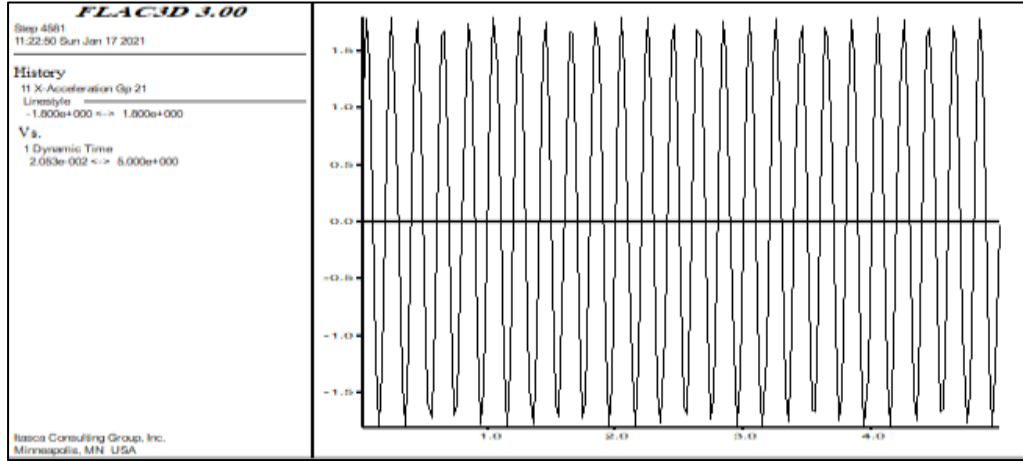
2.3. النتائج العددية:

تم التعبير عن السجل الزمني للزلزال المبين سابقاً بالشكل (3) بقوة تحريض توافقية نعب عنها بالمركبة الأفقية للتسارع موضحة في الشكل (5) حيث:

✓ التردد $f=5\text{Hz}$

✓ التسارع الزلزالي الأعظمي $a_{max} = 0.18g$

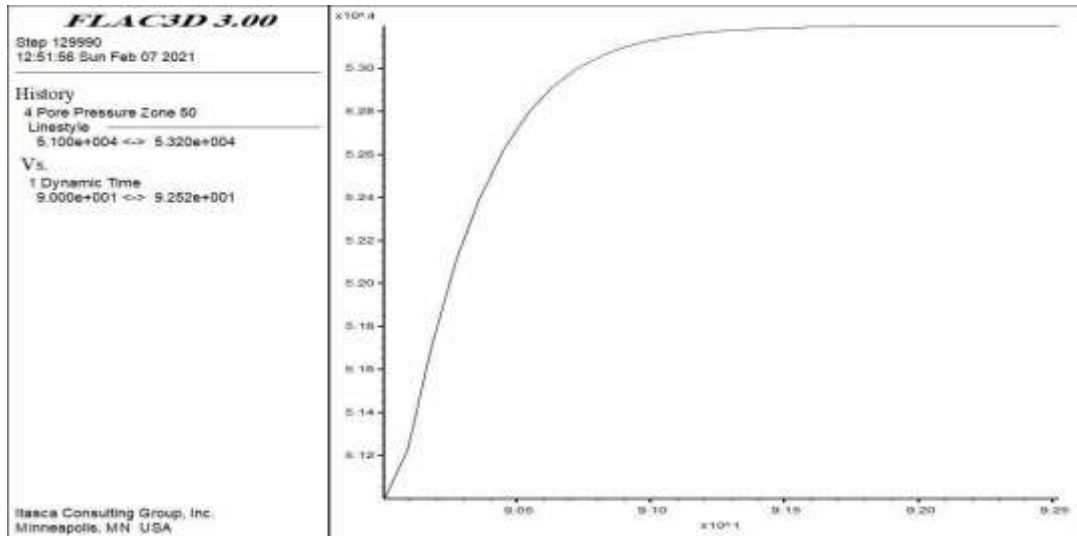
✓ زمن تطبيق القوة يمائل زمن الزلزال $t=30\text{ sec}$



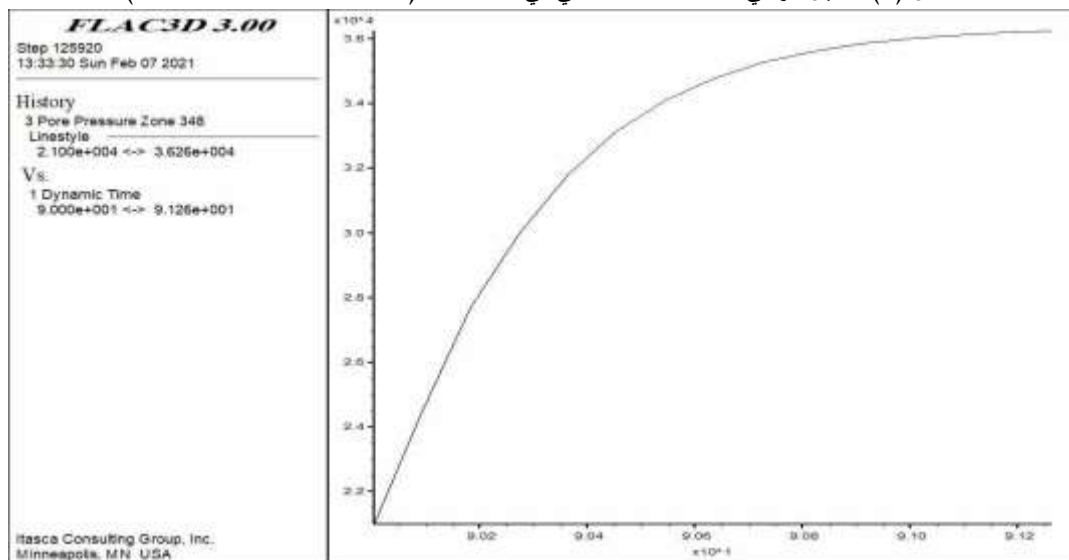
الشكل (5) السجل الزمني للتسارع المطبق على قاعدة الموديل في الاتجاه الأفقي

بإدخال خواص التربة والزلزال للموقع المدروس على الموديل العددي المقدم في الفقرة (6) في برنامج FLAC3D وتوليد ضغط الماء المسامي الديناميكي (Dynamic Pore Pressure Generation) بلاعتماد على موديل Finn (and Byrne Models) نحصل على قيم ضغط الماء المسامي الديناميكي في جميع نقاط الموديل . بعد توليد ضغط الماء المسامي الديناميكي الناتج عن الزلزال نستطيع الحصول على ضغط الماء المسامي الأعظمي في الأعماق المطلوبة وكذلك الحصول على الإجهادات الفعالة وفي النقاط التي يصبح فيها ضغط الماء المسامي مساوياً أو أكبر من الإجهاد الفعال في التربة تكون التربة قد تسيلت وعندما تصبح الإجهادات الفعالة معدومة ففي هذه الحالة تكون التربة قد تسيلت بشكل تام .

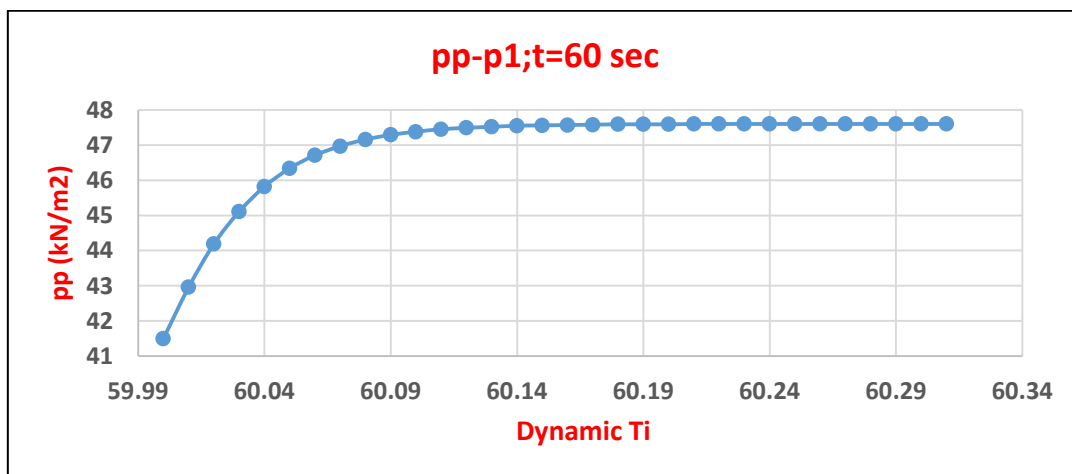
تبين الأشكال (6) و (7) و (8) السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقاط P1, P2 بعد 90 ثانية من بداية الزلزال وتبين السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقطة P1 بعد 60 ثانية من بداية الزلزال.



الشكل (6) السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقطة $p1$ ($p1, t=90sec = 52.8 \text{ kpa}$)

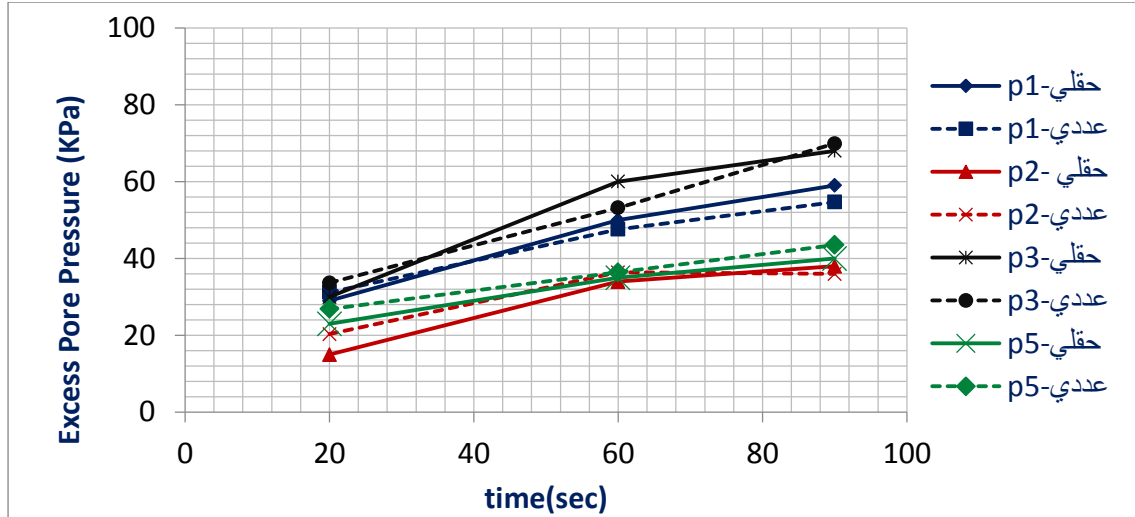


الشكل (7) السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقطة $p2$ ($p2, t=90sec = 36 \text{ kpa}$)

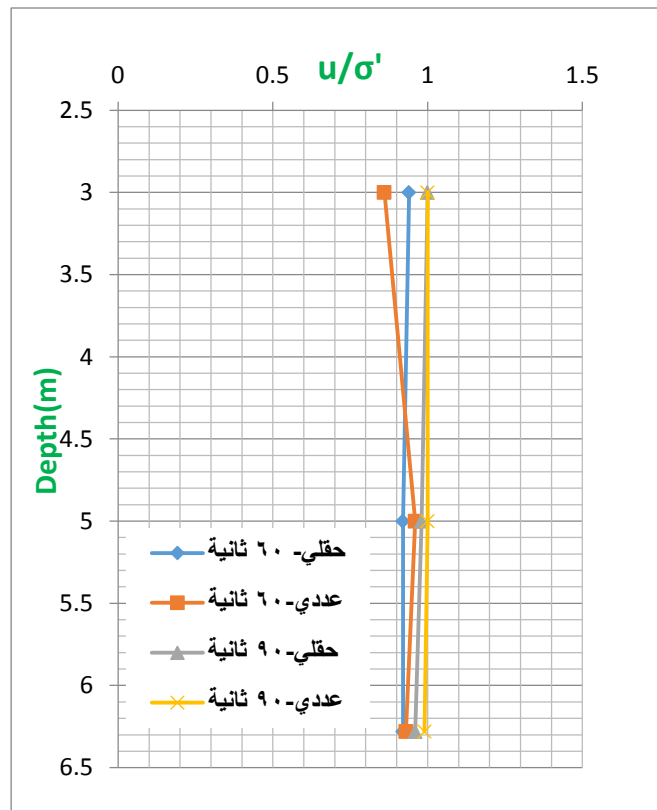


الشكل (8) السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقطة $p1$ بعد 60 ثانية من بداية الزلزال

المقارنة بين النتائج العددية والحقلية للقيم الأعظمية لضغط الماء المسامي في النقاط P1 ,P2,P3 ,P5 بعد 20 و 60 و 90 ثانية من بداية الزلزال موضحة في الأشكال (9) و(10).



الشكل (9) المقارنة بين النتائج العددية والحقلية للقيم الأعظمية لضغط الماء المسامي في النقاط P1 ,P2,P3 ,P5



الشكل (10) مقارنة القيم العددية بالحقلية بالنسبة ل u/σ'

بالمقارنة بين النتائج العددية والقياسات الحقلية نلاحظ وجود تقارب جيد جدا بين الدراستين ومنه نستنتج أنَّ الموديل العددي المقترح قادر على نمذجة تسيل التربة الناتج عن الاهتزازات الزلزالية والتنبؤ باحتمال حدوث التسيل وسماكة الطبقات المتسيلة من التربة.

4- الدراسة البارامترية للعوامل المؤثرة على التسيل:

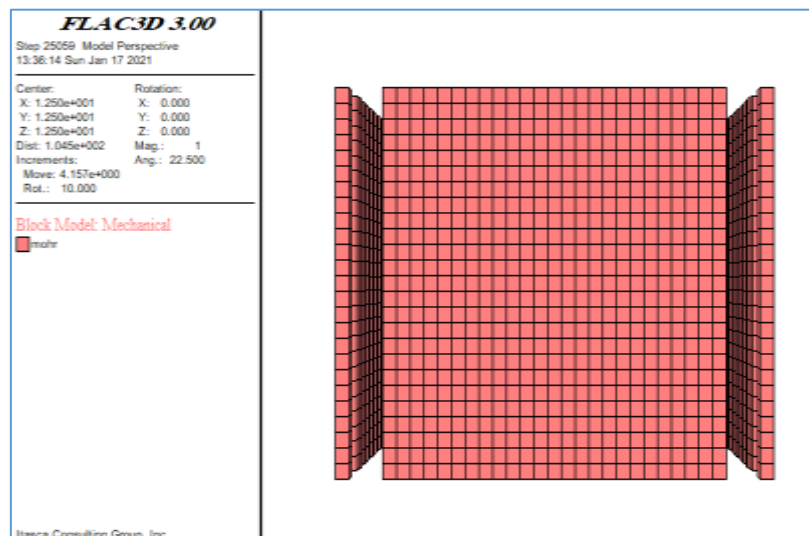
1.4. تقديم المثال النموذجي المستخدم في الدراسة البارامترية:

يتكون الموديل من طبقة واحدة متجانسة من الرمل المشبع بأبعاد $(Lx*Ly*Lz=25*25*25m)$.

✓ كثافة التربة: $\rho = 1780 \text{ kg/m}^3$

✓ معامل القص: $G = 5357 \text{ kpa}$

✓ تم تقسيم التربة في الموديل لشبكة من العناصر المربعة موضحة في الشكل (11)



الشكل (11) تقسيمات الموديل والشروط الطرفية المستخدمة في الموديل (free field Boundary)

سوف نأخذ تخامد التربة بعين الاعتبار باستخدام صيغة التخامد اللزج لرايلي (*Rayleigh Damping*) تم التعبير عن السجل الزمني للزلزال المتوقع بقوة تحريض توافقية وهذه القوة على شكل موجة جيبيية حيث تردد الزلزال $f = 2.5 \text{ Hz}$ والتسارع الزلزالي الأعظمي $a_{max} = 0.18 \text{ g}$.

الجدول (2) خواص التربة المدخلة في الموديل العددي في الدراسة البارامترية

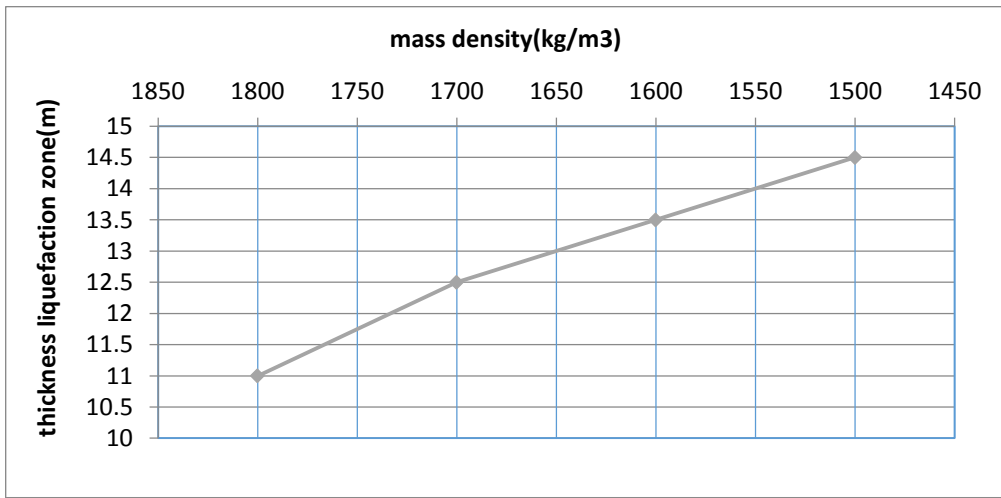
Soil properties			
γ	17.8 kN/m^3	K	$2.1e-6 \text{ m/sec}$
μ	0.4	E	15MPa
n	0.5	ϕ	30°

بإدخال هذه المعطيات على الموديل المستخدم وتغيير قيم البارامتر المدروس وإجراء الحسابات باستخدام برنامج *FLAC3D* نحصل على الإجهادات الفعالة وضغط الماء المسامي أيضاً وفي النقاط التي تصبح فيها ضغط الماء

المسامي يساوي أو أكبر من الإجهاد الفعال ففي هذه الحالة تكون التربة قد تسيلت، وبالتالي نستطيع حساب سماكة المنطقة المتسيلة ومعرفة تأثير البارامتر المدروس على سماكة منطقة التسييل والتي يتم تحديدها بالاعتماد على النسبة $\frac{u}{\sigma'}$ فعندما تصبح النسبة $\frac{u}{\sigma'} \geq 1$ فهذا يعني أن التربة بدأت بالتسييل وفقدت مقاومتها على القص بشكل تدريجي وعندما تتعدم الإجهادات الفعالة تكون التربة قد تسيلت بشكل تام وذلك عند جميع الأعماق المدروسة.

4.2. دراسة تأثير الكثافة على قابلية التسييل:

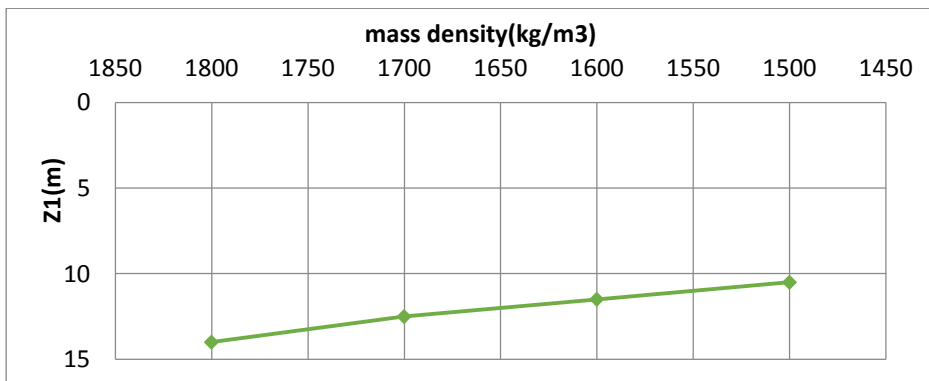
تم دراسة تأثير تغير الكثافة على سماكة المنطقة المتسيلة وإجراء الحسابات من أجل قيم للكثافة kg/m^3 (1800,1700,1600,1500) وكانت النتائج كما هي موضحة في الأشكال (12)،(13):



الشكل (12) تأثير الكثافة على سماكة المنطقة المتسيلة

يتبين من الشكل (12) أن سماكة منطقة التسييل تزداد كلما نقصت كثافة التربة ولذلك تعتبر طريقة زيادة كثافة التربة بالرص أحد أهم الوسائل المتبعة في تحسين الترب المفككة المحتمل تعرضها لحدوث التسييل عند حدوث الزلازل.

يبين الشكل (13) تأثير الكثافة لكل قيمة مدخلة على بداية المنطقة المتسيلة Z_1



الشكل (13) تأثير تغير الكثافة على بداية المنطقة المتسيلة Z_1

نلاحظ من الشكل (13) ان المنطقة المتسيلة ذات تأثير مهمل على الأساسات السطحية التي يكون فيها عمق لتأسيس تقريباً 3 م حيث ان المنطقة المتسيلة تقع على عمق بين (10~14)م

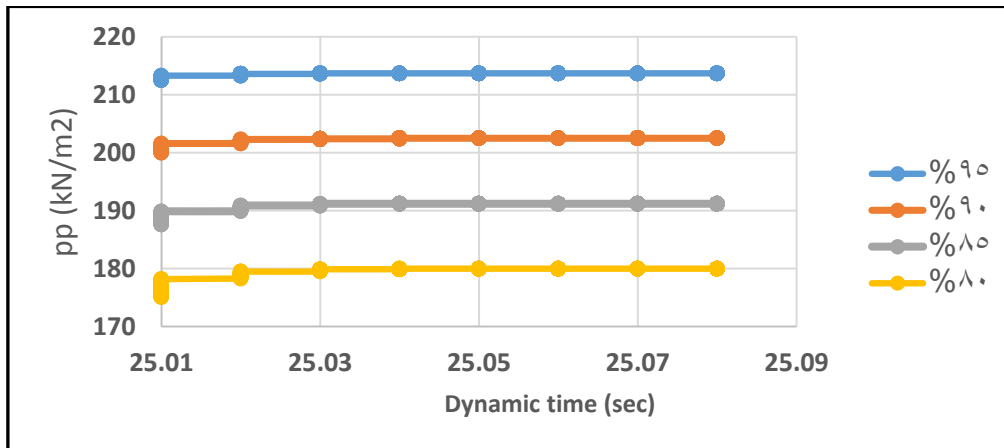
4.3. دراسة تأثير منسوب المياه الجوفية على قابلية التسيل:

قمنا بدراسة تأثير منسوب المياه الجوفية من أجل النسب التالية التي تعبر عن النسبة بين ارتفاع الماء في الموديل إلى الارتفاع الكلي على قابلية التسيل من أجل القيم التالية:

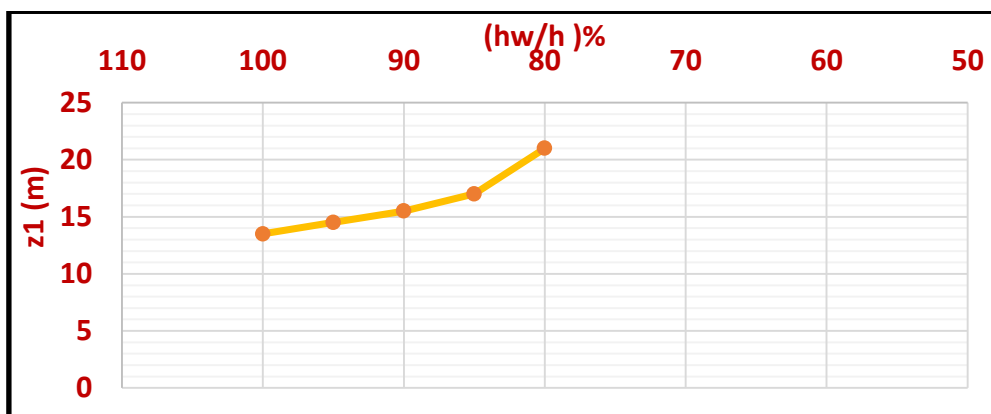
$$hw/h = (100, 95, 90, 85, 80) \%$$

يتم الإدخال في نص الإدخال في تعليمة fluid في برنامج FLAC3d من خلال تعريف درجة الإشباع الموافقة لكل حالة مدروسة وتعريف قيم ضغط الماء المسامي البدائية كذلك.

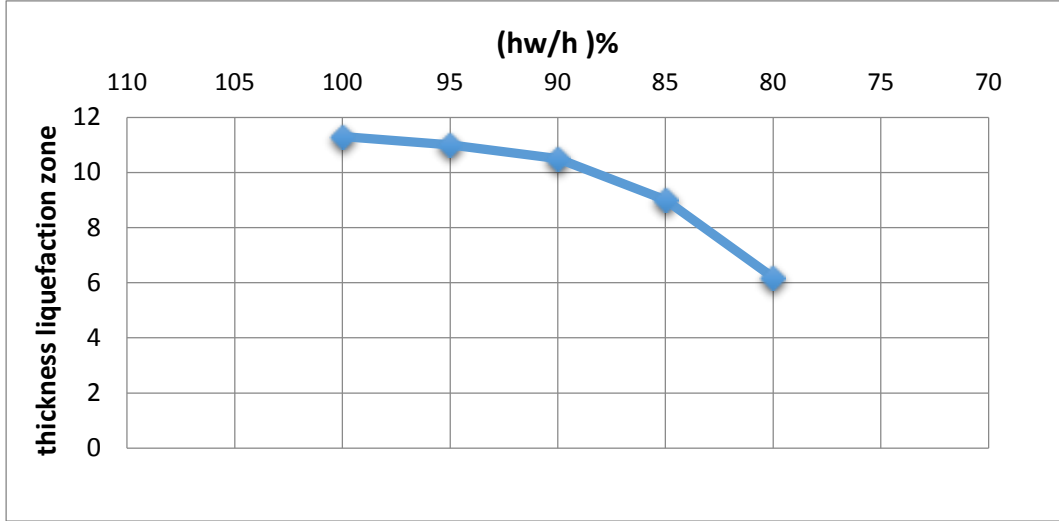
بعد إجراء الحسابات توصلنا للنتائج الموضحة في الأشكال (14)، (15)، (16) حيث يتضح من خلالها تأثير تغير منسوب المياه الجوفية على السجلات الزمنية لضغط الماء المسامي في النقطة P1 التي تقع على عمق 21m وكذلك تأثيرها لكل قيمة مدخلة على بداية و سماكة المنطقة المتسيلة.



الشكل (14) تأثير تغير منسوب المياه الجوفية (hw/h) على السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقطة P1



الشكل (15) تأثير تغير منسوب المياه الجوفية (hw/h) على بداية المنطقة المتسيلة z1



الشكل (16) تأثير تغير منسوب المياه الجوفية على سماكة المنطقة المتسيلة

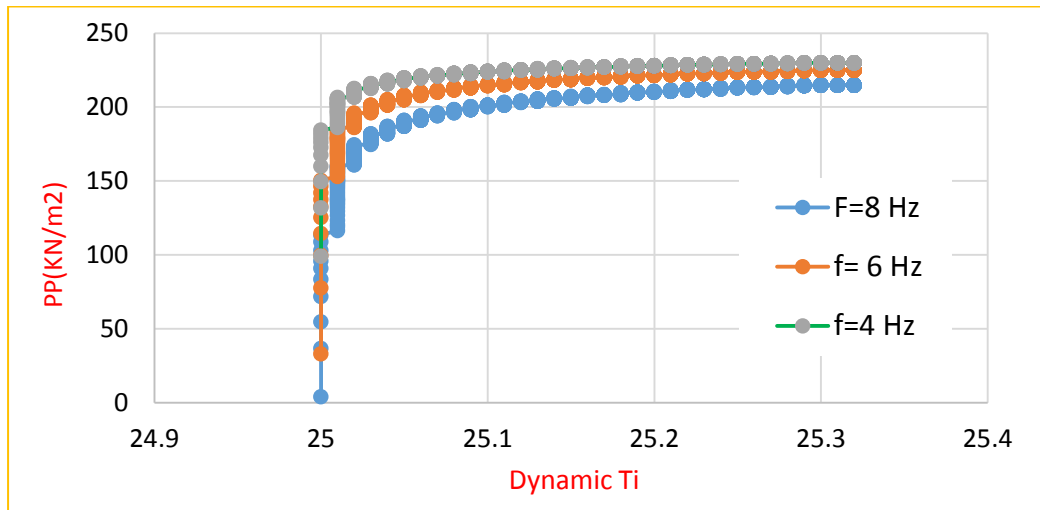
نلاحظ من الشكل (16) أن سماكة منطقة التسييل تزداد مع تزايد درجة الاشباع في الموديل وهذا يرجع إلى ازدياد ضغط الماء المسامي مع اقتراب منسوب المياه الجوفية من سطح الأرض.

4.4. دراسة تأثير التردد على قابلية التسييل:

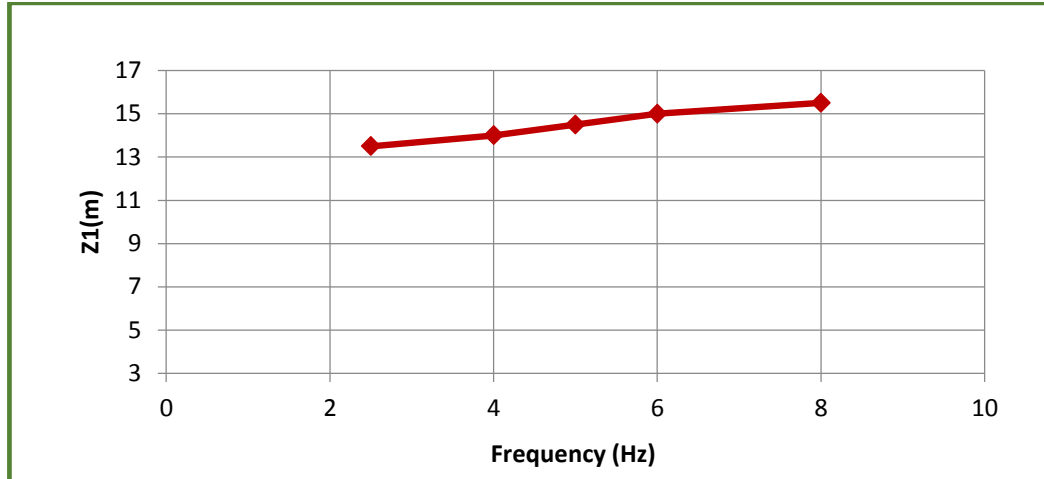
من أجل دراسة تأثير التردد على قابلية الترب للتسييل قمنا بأخذ مكعب التربة المبينة في المثال النموذجي وطبقنا الحركة الزلزالية بإدخال تابع الهارموني للمركبة الأفقية للتسارع مع $a_{max}=0.18g$ وذلك عند القاعدة السفلية للموديل وقمنا بتغيير تردد التابع الهارموني في كل حساب حيث أجرينا الحساب من اجل قيم للتردد

$$f = (2.5 \sim 8) Hz$$

وكانت النتائج كما هي موضحة في الأشكال (17)،(18)،(19):

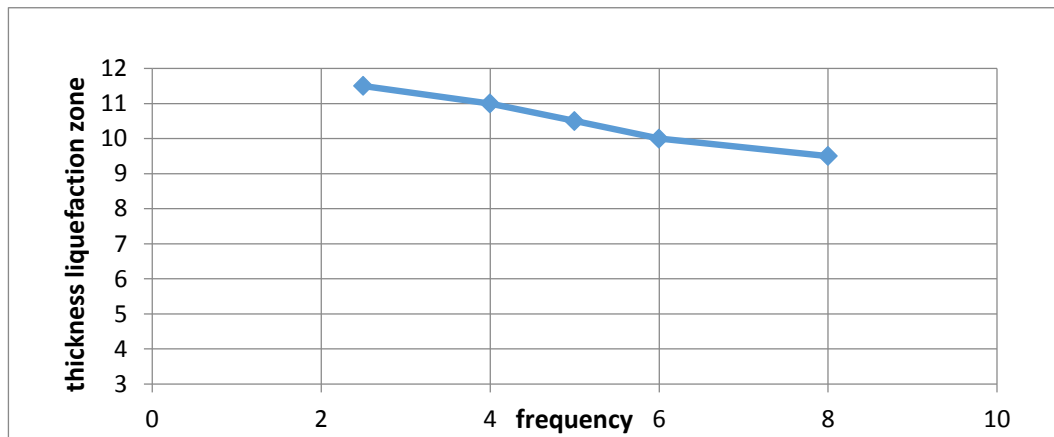


الشكل (17) تأثير تغير تردد الحركة الزلزالية على السجل الزمني لضغط الماء المسامي في النقطة p1



الشكل (18) تأثير تغير التردد على بداية المنطقة المتسيلة z1

نلاحظ من الشكل (18) ان المنطقة المتسيلة ذات تأثير مهمل على الأساسات السطحية التي يكون فيها عمق التأسيس تقريباً 3 م حيث ان المنطقة المتسيلة تقع على عمق بين (13~16)م



الشكل (19) تأثير التردد على سماكة المنطقة المتسيلة

نلاحظ من الشكل (19) أن سماكة منطقة التسييل تتناقص بزيادة التردد ويمكن تفسير ذلك بتناقص طول الموجة المؤثرة

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{حيث ان العلاقة بين التردد وطول الموجة علاقة عكسية كما هو معروف حيث}$$

وهذا يجعل المنطقة المتأثرة بالموجة أقل والزيادة الديناميكية في ضغط الماء المسامي أقل مما يقلل من احتمالية التسييل.

الخلاصة:

يتبين من النتائج السابقة أن ظاهرة تسييل التربة تتأثر بالعديد من العوامل التي يختلف مدى تأثيرها على العمق الأعظمي لمنطقة التسييل ومن الممكن أن نلخص تأثير البارامترات بالنقاط التالية:

- ✓ سماكة منطقة التسييل تزداد كلما نقصت كثافة التربة ولذلك تعتبر طريقة زيادة كثافة التربة بالرص أحد أهم الوسائل المتبعة في تحسين التربة المفككة المحتمل تعرضها لحدوث التسييل عند حدوث الزلزال.
- ✓ القيم الأعظمية لمنطقة التسييل تكون موافقة لمنسوب مياه عند سطح الأرض وتتناقص مع انخفاض منسوب المياه.

✓ سماكة منطقة التسييل تتناقص بزيادة التردد ويمكن تفسير ذلك بتناقص طول الموجة المؤثرة حيث ان العلاقة بين التردد وطول الموجة علاقة عكسية كما هو معروف حيث $\lambda = \frac{c}{f}$ وهذا يجعل المنطقة المتأثرة بالموجة أقل والزيادة الديناميكية في ضغط الماء المسامي أقل مما يقلل من احتمالية التسييل.

الاستنتاجات والتوصيات:

- ✓ تعد منطقة الدراسة التي تحوي تربة مفككة مشبعة محتمل تعرضها للزلازل قابلة للتسييل بشكل عام ويوصى أخذ ذلك بعين الاعتبار عند دراسة أو تنفيذ منشآت جديدة في تلك المنطقة.
- ✓ يوصى باستخدام الطرق العددية لتقييم التسييل لأنها تعطي قيم لضغط الماء المسامي قريبة جداً من الواقع مما يعطي مجال أمان أكبر عند التنفيذ والاستثمار في مناطق معرضة للتسييل بعد التنبؤ الدقيق بعمق المنطقة المحتمل تسييلها ومعالجتها وتحسينها بالوسائل والطرق المتاحة والممكنة، بالإضافة لكونها الأقل كلفة والأسرع استخداماً.
- ✓ تم في هذا البحث تقييم التسييل بحسب الطريقة العددية ويوصى للأبحاث المستقبلية بتقييم التسييل بحسب تجارب حقلية أو مخبرية ترددية.
- ✓ يوصى للأبحاث المستقبلية معرفة حدود المنطقة المتسيلة بالاعتماد على برامج هندسية قادرة على تحديد حدود المنطقة المتسيلة كبرنامج DIANA ونموذج UBC-3D ضمن برنامج PLAXIS.
- ✓ يوصى للأبحاث المستقبلية بتقييم التسييل والأضرار الناجمة عنه (تشوهات التربة الكبيرة والهبوطات) عددياً حيث أن تسييل التربة يعتبر من المواضيع القليلة الدراسة عددياً، واتخاذ الاجراءات اللازمة عند تجاوز الهبوط المحتمل عددياً الهبوط الأعظمي المحسوب بالعلاقات التحليلية كتحسين التربة باستخدام أساسات عميقة.

References:

- 1- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). *Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 127(4), 297-313.*
- 2- Makra, A. (2013). *Evaluation of the UBC3D-PLM constitutive model for prediction of earthquake induced liquefaction on embankment dams.*
- 3- Borowiec, A., & Maciejewski, K. (2014). *Assessment of susceptibility to liquefaction of saturated road embankment subjected to dynamic loads. Studia Geotechnica et Mechanica, 36(1), 15-22.*
- 4- Soroush, A., & Koohi, S. (2004, August). Numerical analysis of liquefaction-induced lateral spreading. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada* (pp. 1-6).
- 5- Manuals Flac3d v3
- 6- Ferrari, G. (2012). *Three-dimensional earthquake response of slopes* (Doctoral dissertation, MSc thesis, Department of Civil Engineering, University of Bologna and Norwegian Geotechnical Institute).
- 7- Petalas, A., & Galavi, V. (2013). *Plaxis Liquefaction Model UBC3DPLM. Plaxis Report.*
- 8- Galavi, V., Petalas, A., & Brinkgreve, R. B. J. (2013). *Finite element modelling of seismic liquefaction in soils. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGS-SEA, 44 (3), 2013.*