مقارنة جيولوجية وجيوتكنيكية لتأثير خصائص التربة على أضرار زلزال تركيا وسوريا 2023

Geological and Geotechnical Comparison of the Influence of Soil Properties on Damage during the 2023 Türkiye–Syria Earthquake

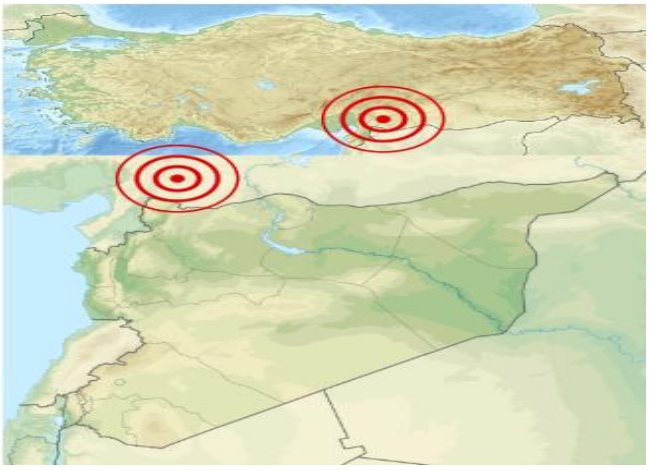
إشراف: د.م. مجد المحمود | إعداد الطالبة: زين عمار دهيمش

ملخص:

يتناول هذا البحث دراسة كيف ولماذا اختلف سلوك التربة في تركيا عنه في سوريا رغم أنهما تعرضا لهزات من نفس المصدر الزلزالي وهل كان لطبيعة التربة وتركيبها الجيولوجي أثناء الزلزال دور في اختلاف حجم الكارثة بين البلدين.

Abstract:

This study investigates how and why soil behavior differed between Turkey and Syria, despite both being subjected to seismic waves originating from the same earthquake source. It examines whether variations in soil properties and geological composition during the event played a significant role in the disparity in the scale of the disaster between the two countries.



الشكل1: يوضح مكان وقوع الزلزال في تركيا وسوريا

المقدمة:

1 – تعريف الزلزال:

الزلزال هو ظاهرة طبيعية وهو اهتزاز أو سلسلة من الاهتزازات الارتجاجية المتتالية لسطح الأرض تحدث في وقت لا يتعدى ثوانٍ معدودة، والتي تنتج عن حركة الصفائح الصخرية في القشرة الأرضية، ويسمى مركز الزلزال «البؤرة»، يتبع ذلك بارتدادات تدعى أمواجاً زلزالية، وهذا يعود إلى تكسر الصخور وإزاحتها بسبب تراكم إجهادات داخلية للأرض نتيجة لمؤثرات جيولوجية ينجم عنها تحرك الصفائح الأرضية [1].

2 – أهمية دراسة قدرة التربة على تحمل الزلازل:

تعد دراسة قدرة التربة على تحمل الزلازل من أبرز الجوانب في الهندسة الزلزالية، إذ تحدد مدى استقرار المنشآت وسلامتها عند تعرضها للاهتزازات الأرضية، ولها أيضا الكثير من الفوائد منها [2]:

a. منع ظاهرة تميُّع التربة (Soil Liquefaction):

يمكن أن تفقد التربة المشبعة قدرتها على تحمل الأحمال أثناء الزلزال (ظاهرة التميع) مما يؤدي إلى انهيار المباني والجسور. لذا يجب تقييم ميل التربة للإسالة لتصميم بنية تحتية مقاومة للزلازل وتقليل آثارها [2].

b. تحديد مناطق الخطورة الزلزالية:

تحليل قدرة التربة على التحمل يساعد في تصنيف المناطق وفق درجة استجابتها للزلازل، وبالتالي يساهم في التخطيط العمراني الآمن وتوجيه عمليات البناء نحو المواقع الأكثر استقرارًا [2].

c. تقليل الخسائر البشرية والمادية:

تساهم هذه الدراسات في تقليل الأضرار الاقتصادية والبشرية الناجمة عن الزلازل من خلال توجيه التخطيط العمراني السليم [2].

3 – تاريخ الزلازل في تركيا وسوريا:

تقع تركيا وسوريا على تقاطع ثلاث صفائح تكتونية، مما يجعلهما من أكثر المناطق زلزالية. شهدت تركيا زلازل مدمرة (إزمير 1999، كهرمان مرعش 2023، بينما تأثرت سوريا تاريخيا بزلازل كبرى عبر صدع

البحر الميت (أنطاكية 526م، حلب 1138م، 1822، 2023). هذا النشاط يفرض دراسة سلوك التربة لمعالجة المخاطر المستقبلية [3].، يبين الجدول التالي مقارنة بين سوريا وتركيا من حيث عناصر مختلفة:

جدول1 : [4].

العنصر	تركيا	سوريا
الموقع الجيولوجي	تقاطع ثلاث صفائح تكتونية (الأناضولية، العربية، الأوراسية)	امتداد صدع البحر الميت
الفوالق النشطة	صدعا شمال وشرق الأناضول	صدع البحر الميت
شدة النشاط	مرتفعة جداً ومستمرة	متوسطة إلى مرتفعة في الشمال
ابرز الزلازل	إزمير 1999 (7.6)، فان 2011 (7.1)، كهرمان مرعش 2023 (7.8)	أنطاكية 526م، حلب 1138م، شمال سوريا 2023
النتيجة	نشاط مرتفع يتطلب مراقبة ودراسة ديناميكية التربة	نشاط أقل تكراراً لكنه يتأثر بالزلازل التركية الكبرى

4 – لمحة عن زلزال 2023 في تركيا وسوريا (الشدة، الاضرار، الموقع):

في 6 فبراير/شباط 2023، ضرب زلزال مدمّر جنوب تركيا وشمال سوريا، ويُعدّ من أقوى الزلازل المسجّلة في المنطقة خلال القرن الأخير. بلغت قوته 7.8 درجة على مقياس ريختر وفقاً لـ هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS)، تلاه بعد تسع ساعات زلزال آخر بقوة 7.5 درجة على بعد نحو 95 كيلومتراً شمال مركز الزلزال الأول.

تسبب زلزال 6 فبراير 2023 في دمار واسع شمل عشر محافظات تركية، أبرزها كهرمان مرعش وغازي عنتاب وهاتاي، وامتدت آثاره إلى شمال سوريا خاصة حلب وإدلب واللاذقية. تجاوز عدد الضحايا 50 ألفًا في تركيا وأكثر من 8 آلاف في سوريا، إضافة إلى مئات الآلاف من الجرحى والمشردين، نتيجة انهيار آلاف المباني بسبب ضعف الإنشاءات وقربها من خط الصدع.

من الناحية الجيوتكنيكية، أدى الزلزال إلى تميُّع واسع للتربة في المناطق الغضارية والرطبة، وتغير في الضغوط المسامية، مما أثر سلباً على استقرار الأساسات والمنشآت الحيوية مثل الجسور والطرق.

يُعتبر زلزال 2023 نقطة تحول في دراسات السلوك الديناميكي للتربة في تركيا وسوريا، إذ أظهر بوضوح كيف أن الاختلاف في طبيعة التربة والتركيب الجيولوجي بين البلدين أدى إلى تفاوت ملحوظ في حجم الأضرار، رغم تعرضهما لهزات أرضية متقاربة الشدة [5].

الشكل 2: صور جوية تظهر حجم الدمار الذي خافه الزلزال في مدينة ادلب في سوريا [6].

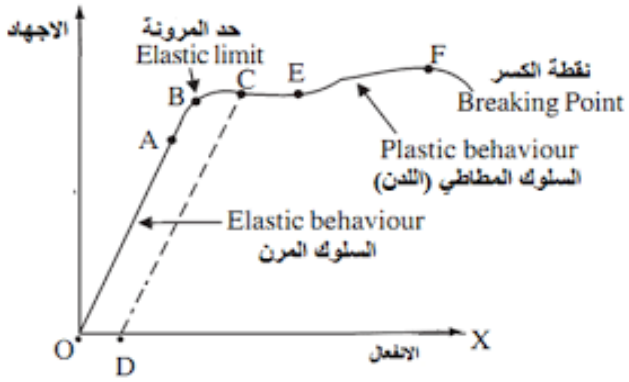
الإطار النظري:

1 – شرح سلوك التربة الديناميكي (قص، تميُّع، تخميد):

سلوك التربة الديناميكي ((Dynamic Soil Behavior هو استجابة التربة للأحمال أو الاهتزازات المتغيرة مع الزمن مثل الزلازل أو المرور أو الانفجارات، ويختلف عن السلوك الساكن بتأثير الزمن والتردد والطاقة، ويعتمد على نوع التربة وكثافتها ورطوبتها ودرجة تشبعها، فيما يلي شرح لأهم الجوانب الثلاثة [7]:

a. سلوك القص (Shear Behavior):

تحت الأحمال الديناميكية، تتولد في التربة إجهادات قصية تسبب تشوهات دورية. مع زيادة الإجهاد، تنتقل التربة من سلوك مرّن إلى غير خطي وغير مرن، مما يؤدي إلى انخفاض معامل القص الديناميكي (Gd) وفقدان قدرتها على مقاومة القص [7].



الشكل 3: العلاقة بين الاجهاد – الانفعال [8].

b. التميُّع (Liquefaction):

تميع التربة: فقدان التربة الرملية المشبعة صلابتها تحت اهتزازات قوية بسبب زيادة ضغط الماء المسامي، فتتحول لحالة شبيهة بالسائل وتسبب هبوط الأرض وانهيار المنشآت. يتأثر بكثافتها المنخفضة، تشبعها العالي، ومدة الاهتزاز [7].

c. التخميد (Damping):

التخميد هو امتصاص التربة للطاقة الاهتزازية عبر الاحتكاك الداخلي ولزوجة الماء، ويزداد في التربة الغضارية المشبعة ويقل في الرملية [7].

2 – أنواع الترب واستجابتها للاهتزازات الزلزالية:

تختلف استجابة التربة للاهتزازات الزلزالية تبعًا لنوعها وتركيبها وخصائصها الجيوتكنيكية .ويمكن تصنيفها بشكل عام إلى ما يلي:

- **التربة الرملية (Sandy Soils):**

تميل إلى فقدان تماسكها أثناء الاهتزاز، خصوصًا إذا كانت مشبعة بالماء، مما يجعلها عرضة لظاهرة تميُّع التربة التي تسبب هبوط الأرض وانهيار الأساسات [9].

- **التربة الغضارية (Clayey Soils):**

تُظهر مقاومة أكبر للتميُّع، لكنها تتأثر ببطء بالأحمال الديناميكية، مما يؤدي إلى تشوهات طويلة الأمد أو انزلاقات في بعض الحالات [9].

- **التربة الحصوية (Gravelly Soils):**

تتميز بصلابة عالية ونفاذية جيدة، لذا فهي أقل عرضة للتميُّع، وتُعتبر من أفضل أنواع الترب لتحمل الاهتزازات الزلزالية [9].

- **التربة العضوية والرخوة (Soft or Organic Soils):**

تُضخّم الموجات الزلزالية بسبب انخفاض صلابتها، مما يزيد من اهتزاز المباني والأساسات فوقها، حتى لو كانت بعيدة عن مركز الزلزال [9].

الخصائص الجيولوجية والتقنية للمنطقتين:

1 – لمحة جيولوجية عن تركيا وشمال سوريا (مناطق الزلزال):

تُعد تركيا وسوريا جزءًا من الحزام الزلزالي المتوسطي – الهيمالايا، حيث تتقاطع عدة صفائح تكتونية رئيسية، أبرزها [10]:

- **الصفائح الأوراسية، العربية، والأناضولية.**
  - **تركيا:**

– تقع معظم المناطق المتأثرة بالزلزال على طول صدع شرق الأناضول والصدع الشمالي الأناضولي، وهما صدعان نشطان يؤديان إلى تراكم الطاقة الزلزالية [10].

– تختلف طبيعة التربة بين الصخور الصلبة في المرتفعات والترب الرسوبية في السهول، مما يفسر تباين الدمار بين المحافظات [10].

  - **شمال سوريا:**

– تقع على امتداد الصدع الأناضولي الغربي وصدوع فرعية، وتتميز بتربة أكثر رسوبية ورخوة، خاصة في محافظات حلب وإدلب [10].

– تزيد هذه الطبقات الرسوبية من تضخيم موجات الزلزال، ما يؤدي إلى خسائر أكبر في المناطق المنخفضة [10].

2 – نوعية التربة السائدة في كل منطقة وتأثيرها على الاستجابة الزلزالية:

التربة في تركيا وسوريا متنوعة، لكن هناك اختلافات واضحة تؤثر في استجابتها للزلازل:

- **في تركيا:**

الترب الرسوبية الحديثة في المناطق الساحلية والأودية (كمرمرة وإزمير وشرق الأناضول) تكون ناعمة ومشبعة بالمياه، مما يزيد من احتمالية تضخيم الموجات الزلزالية وظاهرة التميع، ما يؤدي إلى دمار أكبر في الأبنية [11].

- **في سوريا:**

في سوريا، تغلب الترب الكلسية والغضارية الصلبة على الهضاب والجبال، مع ترب ناعمة محدودة في سهل الغاب والساحل، فتكون أقل تضخيمًا للزلازل من تركيا، رغم قربها من فوالق نشطة كفالق البحر الميت [11].

3– مقارنة بين تركيب الطبقات الأرضية وخصائصها الفيزيائية:

تركيب الطبقات الأرضية وخصائصها الفيزيائية يختلفان بين تركيا وسوريا من حيث البنية الجيولوجية وخصائص الصخور كما هو موضح:

جدول 2: [12].

المقارن	سوريا	تركيا
التركيب	صخور كلسية، بازلتية متجانسة	مزيج معقّد من صخور رسوبية، نارية، متحوّلة
التربة	ترب ثابتة في الهضاب مع تميّع أقل	ترب رخوة في السهول تسبّب تميّعاً
الاستجابة الزلزالية	اهتزازات أقل تضخيماً	تضخيم عالٍ في الترب الرخوة
النشاط التكتوني	متوسط (صدع البحر الميت)	مرتفع جداً (تقاطع 3 صفائح)

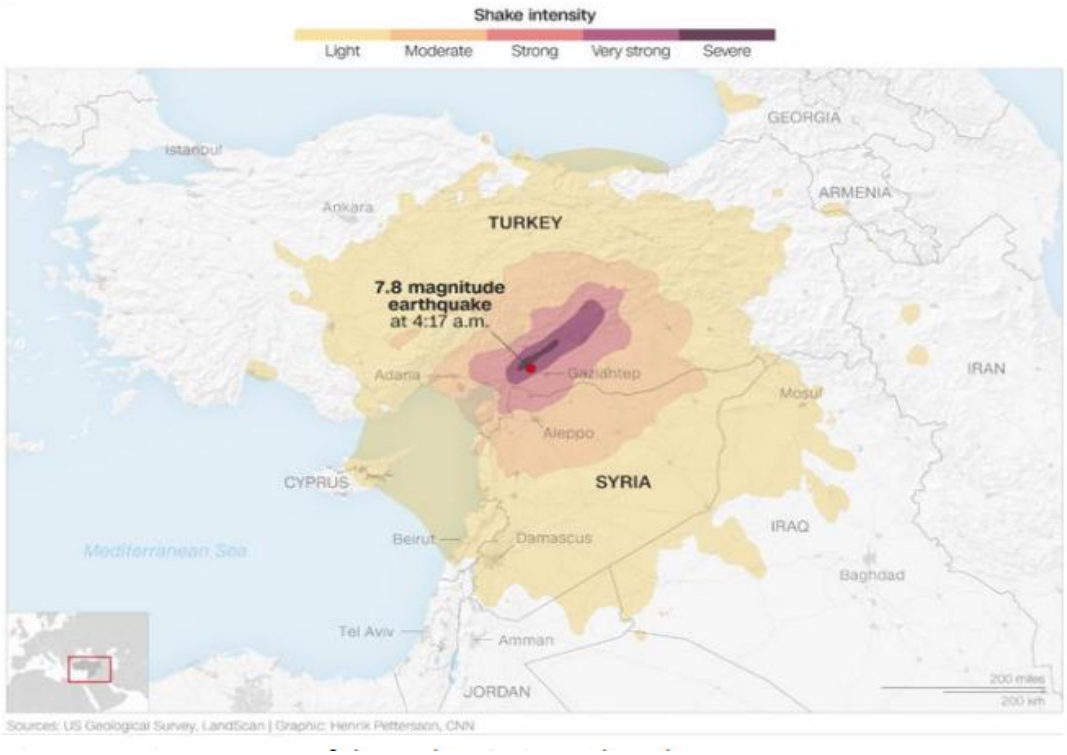
التحليل الديناميكي لسلوك التربة أثناء زلزال 2023:

1 – مقارنة بين شدة الاهتزازات في المنطقتين:

بصورة عامة الاختلافات بالشدة كانت واضحة بين سوريا وتركيا بسبب عوامل مختلفة منها شدة الزلزال والقرب من مصدر الزلزال وغيرها ويوضح هذا الجدول هذه الاختلافات [13]:

جدول 3: [13].

المؤشر	سوريا	تركيا
موقع مركز الزلزال	مئات الكيلومترات بعيداً	داخل الأرض (Pazarcık)
شدة الزلزال (Mw)	تأثير موجات نفس الزلزالين	7.8 و7.7
أقصى تسارع أرضي (PGA)	g 0.4 – 0.2	g <(2)
شدة ميركالي المعدّل (MMI)	VII–VIII	XI–XII
حال الأبنية	أضرار متوسطة–شديدة في القديم/الضعيف	انهيارات واسعة ودمار شامل
تأثير الموقع الجيولوجي	تضخيم محلي متوسط	تضخيم كبير في الأحواض الرسوبية
العامل الرئيسي في الضرر	بعد المسافة + هشاشة البنية	قرب المركز + تضخيم التربة



الشكل 4: تدرج شدة الزلزال [22].

2 – التغير في الضغوط المسامية والتميُّع اثناء التربة:

زلزال 2023 رفع ضغط الماء في مسام الترب المشبعة، فانخفض إجهاد الحبيبات وحدث التميّع (تحول التربة إلى سائل) ما أدى الى هبوط الأساسات وانهيارات في هاتاي وغازي عنتاب، بينما بقيت الظاهرة محدودة في سوريا لبعدها عن المركز واختلاف التربة [14].

الشكل 5: حجم الضرر في مدينة انطاكيا في تركيا [23].

العوامل المؤثرة في اختلاف السلوك الديناميكي:

1 – اختلاف الكثافة والتدرج الحبي للتربة:

يُظهر الاختلاف في الكثافة والتدرج الحبيبي للتربة بين تركيا وسوريا تبايناً واضحاً في الخصائص الجيوتكنيكية نتيجة لاختلاف الطبيعة الجيولوجية والمناخية في كل منطقة [15][16].

في تركيا، خصوصًا في مناطق الزلازل مثل كهرمان مرعش وغازي عنتاب وهاتاي، تتكون الترب غالباً من رواسب نهرية وغضارية ورملية مشبعة ذات كثافة منخفضة إلى متوسطة وتدرج حبيبي ضعيف، ما يجعلها أكثر قابلية للتميُّع والانضغاط أثناء الاهتزازات الزلزالية [15][16].

أما في شمال سوريا، مثل مناطق حلب واللاذقية وإدلب، فالتربة تتكون من رواسب كلسية وغضارية أكثر تماسُكاً، ذات كثافة أعلى وتدرج حبيبي أفضل، مما يمنحها مقاومة أكبر للتشوهات والانزلاقات مقارنة بالتربة التركية في مناطق الصدوع [15][16]، يبين الجدول (4) مقارنة جيولوجية بين البلدين:

جدول 4: [17][18].

الخاصية	سوريا	تركيا
الكثافة	متوسطة إلى عالية	منخفضة إلى متوسطة
النوع السائد	كلسية وغضارية متماسكة	رملية وغضارية مشبعة
التدرج الحبيبي	جيد – أكثر انتظاماً	ضعيف – غير منتظم
القابلية للتميُّع	منخفضة نسبياً	مرتفعة في المناطق الرملية المشبعة
استجابة التربة للاهتزاز	أكثر ثباتًا ومقاومة	أكثر عرضة للتشوه والانضغاط

2 – تأثير البنية التحتية والأنشطة البشرية:

في تركيا، التوسّع العمراني السريع وتهاون معايير البناء، إلى جانب الضغط الصناعي واستخراج المياه الجوفية، زادت من دمار الزلزال ومن خطر التميّع والانهيار [19].

في سوريا، ضعف البنية التحتية بسبب الحرب وغياب الصيانة، مع العمران العشوائي، زاد من انهيار المباني رغم أن شدة الاهتزاز كانت أقل [19].

3 ـ عمق منسوب المياه الجوفية:

يختلف عمق منسوب المياه الجوفية بين تركيا وسوريا تبعاً للتضاريس والمناخ ونوع الطبقات الجيولوجية في كل منطقة [20][21]:

- **في تركيا**: يتباين منسوب المياه الجوفية بشكل كبير بين المناطق الساحلية والداخلية، إذ يكون ضحلاً (10–30 م) في السهول الخصبة مثل سهل قونية وسهل الأناضول، بينما يزداد العمق إلى أكثر من 100متر في المناطق الجبلية الجافة أو الصخرية مثل شرق الأناضول. ويُغذّى هذا المنسوب أساساً من الأمطار والثلوج الذائبة [20][21].
- **في سوريا** :يتراوح منسوب المياه الجوفية عادة بين (20–60) م في السهول مثل الغاب وحمص وحلب، وقد يتجاوز 100متراً في المناطق الجافة مثل البادية السورية ودير الزور. ويعاني من انخفاض واضح في السنوات الأخيرة بسبب الجفاف والاستخراج المفرط [20][21].

ـ ما العلاقة بين عمق منسوب المياه الجوفية والزلازل؟

كلما كان منسوب المياه الجوفية ضحلاً زادت الضغوط المسامية في الصخور، مما يُسهّل انزلاق الفوالق وحدوث الزلازل .أما إذا كان عميقاً تقل هذه الضغوط ويضعف تأثيرها على النشاط الزلزالي.

الاستنتاجات والتوصيات:

1 – اهم الاستنتاجات من المقارنة:

- **تركيا:** اهتزاز أقرب للمركز فكان أشد، تربتها مشبعة رخوة مما أدى الى تميع وانهيارات، مباني حديثة لكن كثافة سكانية عالية فدمر كثيراً، استجابة إنقاذ سريعة ومنظمة.
- **سوريا:** اهتزاز أخفّ لكن تربة أقل تماسكاً، بنية تحتية قديمة ومهملة مما أدى الى انهيارات واسعة، إنقاذ بطئ بسبب الحرب فالخسائر البشرية ارتفعت نسبياً.

2 – توصيات لتحسين مقاومة التربة في المناطق الزلزالية:

- ضغط وإحكام التربة (دمك، إزالة الهواء).
- إضافة الأسمنت أو الجير لزيادة التماسك.
- إنشاء جدران ساحبة أو أعمدة حجرية لتحسين الاستقرار.
- خفض منسوب المياه الجوفية بالصرف للتقليل من خطر التميّع.
- استخدام طبقات حصى او خرسانة مسلحة تحت الاساسات لتوزيع الاحمال.

المراجع (References):

[1] Kebede, M. A. (2020). Introduction to seismology: An overview of earthquake. Jimma University. https://www.researchgate.net/publication/345824789

[2] ACM. (2025). Proceedings of the 2025 3rd International Conference on Computer Science and Management Engineering. ACM. https://dl.acm.org/doi/10.1145/3745533.3745632

[3] Pastén, D., Vogel, E. E., Saravia, G., & Posadas, A. (2025). Spatial, temporal, and dynamic behavior of different entropies in seismic activity: The February 2023 earthquakes in Türkiye and Syria. Entropy, 27(5), 462. https://doi.org/10.3390/e27050462

[4] Billi, A., Cuffaro, M., Iezzi, F., Neri, G., & Scrocca, D. (2024). Seismic slip channeling along the East Anatolian Fault illuminates long-term supercycle behavior. Nature Communications, 15, 9049. https://doi.org/10.1038/s41467-024-53234-0

[5] University of North Carolina at Chapel Hill. (2023, February 9). *Why were the earthquakes in Turkey and Syria so devastating?* https://www.unc.edu/discover/why-were-the-earthquakes-in-turkey-and-syria-so-devastating/

[6] NBC News. (2023, February 8). Syria earthquake: Rebel-held areas face civil war, survivors, cold winter. https://www.nbcnews.com/news/world/syria-turkey-earthquake-rebel-held-civil-war-survivors-cold-winter-rcna69463

[7] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its consequences. The National Academies Press. https://www.nationalacademies.org/read/23474/chapter/4

[8] Vedantu. (n.d.). Which of the following is called the limit up to... https://www.vedantu.com/question-answer/which-of-the-following-is-called-the-limit-up-to-class-11-physics-cbse-5f2e1149d2506876ecbcce66

[9] Cao, Z., Yuan, X., & Youd, T. L. (2021). Seismic gravelly soil liquefaction assessment based on dynamic penetration test using expanded case history dataset. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 151, 106982. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106982

[10] Ozer, C., & Kaya, Z. (2024). The catastrophic effects of the 2023 Kahramanmaras earthquake on the built environment in Turkey. Scientific Reports, 14, 61326. https://doi.org/10.1038/s41598-024-61326-6

[11] Çelik, S., & Özmen, Ö. F. (2025). Characterizing soil dynamic parameters through ambient seismic noise in the Sakarya Region of the North Anatolian Fault System. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 1–27. https://doi.org/10.5194/nhess-2025-28

[12] Soghrat, M. R., Jafarian, Y., & Zafarani, H. (2024). The 2023 Turkey–Syria earthquake sequence: Ground-motion and local site-effect analyses for Kahramanmaras city. International Journal of Civil Engineering, 22(4), 877–900. https://doi.org/10.1007/s40999-023-00917-2

[13] Soghrat, M. R., Jafarian, Y., & Zafarani, H. (2024). The 2023 Turkey–Syria earthquake sequence: Ground-motion and local site-effect analyses for Kahramanmaras city. *International Journal of Civil Engineering*, *22*(4), 877–900. https://doi.org/10.1007/s40999-023-00917-2

[14] Soghrat, M. R., Jafarian, Y., & Zafarani, H. (2024). The 2023 Turkey–Syria earthquake sequence: Ground-motion and local site-effect analyses for Kahramanmaras city. International Journal of Civil Engineering, 22(4), 877–900. https://doi.org/10.1007/s40999-023-00917-2

[15] Al-Maleh, A., & Al-Maleh, A. (2025). Geohazard assessment of historic chalk cavity collapses in Aleppo, Syria. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/397211226

[16] Al-Maleh, A., Al-Maleh, A., & Al-Maleh, A. (2025). Geohazard assessment of historic chalk cavity collapses in Aleppo, Syria. Journal of African Earth Sciences, 105731. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2025.105731

[17] AFAD. (n.d.). Turkish Disaster and Emergency Management Authority. https://en.afad.gov.tr/

[18] درمش، م. خ.، الفرواتي، م.، & البلخي، م. (1982). أساسيات علم التربة. جامعة حلب.

[19] Alexander, D. (2023). Reflections on the Turkish-Syrian earthquakes of 6th February 2023: Building collapse and its consequences. UCL Institute for Risk and Disaster Reduction. https://blogs.ucl.ac.uk/irdr/2023/02/09/reflectio ns-on-the-turkish-syrian-earthquakes/

[20] Yilmaz, M. T., & Yilmaz, M. (2021). The GRACE-based assessment of the spatio-temporal variability of terrestrial and ground water storage over Turkey. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/356918370

[21] Yilmaz, M. T., & Yilmaz, M. (2011). Water status in the Syrian water basins. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/220243186

[22] IARU Region 1. (2023, February 6). Türkiye earthquake — 6 February 2023. https://www.iaru-r1.org/2023/turkiye-earthquake-6-february-2023/

[23] Reuters. (2023, February 7). Families beg for help to find loved ones in snow-covered earthquake debris. https://www.reuters.com/world/middle-east/families-beg-help-find-loved-ones-snow-covered-earthquake-debris-2023-02-07/