Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (3) (JUNE, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 3 يونيو 2026
ردمد: 3135-2359

ديناميات قوس الاندساس الهِلّيني والاستقرار السيسموتكتوني لشرق ليبيا: انتقال الإجهادات والمخاطر الزلزالية والتسونامية على هامش سيرينايكا

علي احميدة محمد الشهيبي
محاضر بالمعهد العالي للعلوم والتقنية الابيار
ali.ahmedah@hista.edu.ly

Dynamics of the Hellenic Subduction Arc and Seismotectonic Stability of Eastern Libya: Stress Transmission and Seismic and Tsunami Hazards on the Cyrenaica Margin

Ali Ahmeida Mohamed Al-Shahibi
Lecturer at the Higher Institute of Science and Technology, Al-Abyar

تاريخ الاستلام: 2026/04/21 تاريخ المراجعة 05/23/ 2026 تاريخ القبول:2026/06/07- تاريخ النشر: 06/30/ 2026

الملخص

تتناول هذه الدراسة الاستقرار السيسمو-تكتوني لشرق ليبيا في ضوء ديناميات قوس الاندساس الهِلّيني، بوصفه أحد أكثر أنظمة الاندساس نشاطًا وتعقيدًا في شرق البحر المتوسط. وتنطلق الدراسة من فرضية مفادها أن هامش سيرينايكا والساحل الشمالي الشرقي لليبيا، رغم ابتعادهما عن نطاق الاندساس المباشر، لا يمثلان مجالًا جيوديناميكيًا معزولًا، بل يقعان ضمن نطاق تأثر غير مباشر بعمليات تقارب إفريقيا–أوراسيا، واندساس اللوح الإفريقي، وتراجع اللوح الغاطس، وإعادة توزيع الإجهادات عبر مقدمة المتوسط الرسوبية.

اعتمدت الدراسة على مقاربة جيوديناميكية–سيسمو-تكتونية تكاملية، استندت إلى تحليل هندسة اللوح الغاطس، وخصائص قوس الاندساس الهِلّيني، وحركة الكتلة الإيجية وفق القياسات الجيوديسية، إضافة إلى السجل التاريخي للأحداث الزلزالية والتسونامية الكبرى، والنشاط الزلزالي الحديث المسجل آليًا في شرق المتوسط. كما استفادت من نماذج Slab2، وقواعد بيانات الصدوع النشطة، وكتالوجات الزلازل الدولية، وخرائط الخطر الزلزالي، وبيانات الأعماق البحرية، بهدف تفسير العلاقة بين البنية التكتونية الإقليمية والحساسية السيسمو-تكتونية لهامش سيرينايكا.

أظهرت النتائج أن قوس الاندساس الهِلّيني لا يمثل مجرد مصدر زلزالي بعيد عن ليبيا، بل يشكل منظومة جيوديناميكية إقليمية قادرة على التأثير غير المباشر في الاستقرار السيسمو-تكتوني لشرق ليبيا، من خلال انتقال الإجهادات وإعادة تنظيمها عبر شرق المتوسط. كما بينت الدراسة أن تباين هندسة اللوح الغاطس، وآليات تراجعه، وحركة الكتلة الإيجية، ينتج نظام إجهادات مركبًا يجمع بين الانضغاط، والتمدد، والقص التحويلي، وينعكس ذلك على أنماط النشاط الزلزالي في جنوب كريت، وبحر إيجه، والبحر الأيوني، وقطاع رودس–كوس.

وتشير الدراسة إلى أن البنية الجيولوجية لسيرينايكا، بما تتضمنه من صدوع موروثة، وتراكيب كربوناتية، وهضبة مرتفعة، ورف قاري متصل بالحوض المتوسطي، تجعل الإقليم قابلًا للتأثر بدرجات متفاوتة بتغيرات حقل الإجهادات الإقليمي. وتدفع هذه المعطيات إلى طرح فرضية تفسيرية مفادها أن بعض مظاهر إعادة التنشيط الصدعي والرفع التفاضلي في هامش سيرينايكا قد ترتبط، بصورة غير مباشرة وقابلة للتحقق، بديناميات الاندساس الهِلّيني وتراجع اللوح الغاطس، من خلال دورهما في إعادة تنظيم الإجهادات الإقليمية داخل شرق المتوسط. كما تؤكد الدراسة أن المخاطر المحتملة على الساحل الليبي الشرقي لا ترتبط بالنشاط الزلزالي المحلي وحده، بل تشمل أيضًا قابلية التأثر بالأحداث الزلزالية–التسونامية الإقليمية الكبرى، كما يوضحه زلزال كريت سنة 365م وما ارتبط به من تسونامي امتد أثره إلى السواحل الجنوبية للمتوسط.

وتخلص الدراسة إلى أن شرق ليبيا ينبغي أن يُفهم بوصفه هامشًا منخفضًا إلى متوسط الحساسية السيسمو-تكتونية ضمن نظام إقليمي نشط، لا بوصفه نطاقًا مستقرًا بالكامل. وتوصي بتعزيز شبكات الرصد الزلزالي والجيوفيزيائي، وتطوير قاعدة بيانات وطنية للصدوع والبنى التكتونية، وإعداد نماذج احتمالية للمخاطر الزلزالية والتسونامية، وإدماج الاعتبارات السيسمو-تكتونية ضمن سياسات التخطيط العمراني الساحلي وإدارة المخاطر، خاصة في المدن الساحلية الحساسة مثل درنة وسوسة وطبرق.

الكلمات المفتاحية: قوس الاندساس الهِلّيني؛ الاستقرار السيسمو-تكتوني؛ شرق ليبيا؛ سيرينايكا؛ انتقال الإجهادات التكتونية؛ إعادة التنشيط الصدعي؛ الرفع التفاضلي؛ الزلازل؛ التسونامي؛ تراجع اللوح الغاطس؛ المخاطر الساحلية.

Abstract

This study examines the seismotectonic stability of eastern Libya in light of the dynamics of the Hellenic subduction arc, one of the most active and complex subduction systems in the eastern Mediterranean. It is based on the hypothesis that the Cyrenaican margin and the northeastern coast of Libya, despite their distance from the direct subduction zone, do not

constitute a geodynamically isolated margin. Rather, they lie within a zone of indirect influence related to Africa–Eurasia convergence, the subduction of the African slab, slab rollback, and the redistribution of tectonic stresses across the Mediterranean Ridge.
The study adopts an integrated geodynamic–seismotectonic approach based on the analysis of slab geometry, the structural characteristics of the Hellenic subduction arc, and the southwestward motion of the Aegean block as indicated by geodetic measurements. It also examines the historical record of major seismic and tsunami events, as well as recent instrumentally recorded seismicity in the eastern Mediterranean. In addition, the study draws on Slab2 models, active fault databases, international earthquake catalogues, seismic hazard maps, and bathymetric data to interpret the relationship between regional tectonic structure and the seismotectonic sensitivity of the Cyrenaican margin.
The findings indicate that the Hellenic subduction arc is not merely a distant seismic source relative to Libya, but rather a regional geodynamic system capable of indirectly influencing the seismotectonic stability of eastern Libya through the transfer and reorganization of stresses across the eastern Mediterranean. The study also shows that variations in slab geometry, slab rollback mechanisms, and the motion of the Aegean block generate a complex stress regime involving compression, extension, and strike-slip deformation. This regime is reflected in the patterns of seismic activity observed south of Crete, in the Aegean Sea, the Ionian Sea, and the Rhodes–Kos sector.
The study further suggests that the geological structure of Cyrenaica, including inherited faults, carbonate formations, an elevated plateau, and a continental shelf connected to the Mediterranean basin, makes the region variably sensitive to changes in the regional stress field. These observations support an interpretive hypothesis that some aspects of fault reactivation and differential uplift along the Cyrenaican margin may be indirectly and testably related to the dynamics of Hellenic subduction and slab rollback, particularly through their role in reorganizing regional stresses within the eastern Mediterranean. The study also emphasizes that potential hazards along the eastern Libyan coast are not limited to local seismicity, but also include exposure to major regional seismic–tsunami events, as illustrated by the AD 365 Crete earthquake and its associated tsunami, which affected the southern shores of the Mediterranean.
The study concludes that eastern Libya should be understood as a low- to moderate-sensitivity seismotectonic margin within an active regional system, rather than as a fully stable zone. It recommends strengthening seismic and geophysical monitoring networks, developing a national database of faults and tectonic structures, preparing probabilistic models for seismic and tsunami hazards, and integrating seismotectonic considerations into coastal urban planning and risk management policies, particularly in sensitive coastal cities such as Derna, Susa, and Tobruk.

Keywords: Hellenic subduction arc; seismotectonic stability; eastern Libya; Cyrenaica; tectonic stress transfer; fault reactivation; differential uplift; earthquakes; tsunami; slab rollback; coastal hazards.

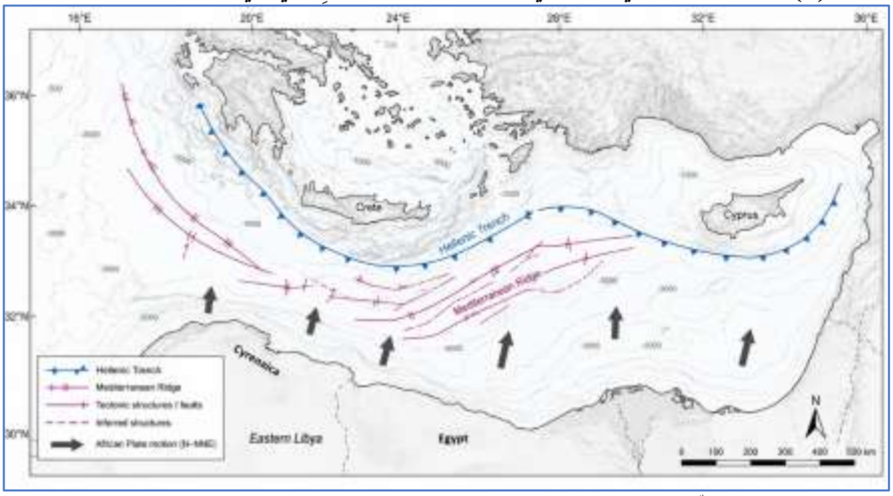
1. المقدمة

يُمثل شرق البحر المتوسط أحد أكثر الأقاليم الجيوديناميكية نشاطًا وتعقيدًا في العالم، نتيجة التفاعل المستمر بين الصفيحتين الإفريقية والأوراسية، وما يرتبط بهذا التفاعل من عمليات اندساس، وتشوه قشري، ونشاط زلزالي، ومخاطر تسونامية ذات امتداد إقليمي. ويُعدّ قوس الاندساس الهِلّيني (Hellenic Subduction Arc) أحد أبرز العناصر البنيوية الفاعلة داخل هذا النظام، حيث يندفع اللوح الإفريقي أسفل الحافة الجنوبية للصفيحة الإيجية–الأوراسية، مولدًا نطاق اندساس نشطًا يمتد من غرب اليونان والبحر الأيوني، مرورًا بجنوب كريت، وصولًا إلى رودس والقطاع الانتقالي نحو شرق المتوسط (Reilinger et al., 2006; Vernant et al., 2014). وقد أسهم هذا النظام التكتوني في إعادة تشكيل البنية الجيولوجية والزلزالية لشرق المتوسط من خلال تداخل عمليات الاندساس والانضغاط والتمدد الخلفي والقص التحويلي، الأمر الذي جعله من أهم النطاقات المولدة للمخاطر الجيوديناميكية في الحوض المتوسطي.

ويُظهر شكل (1) الإطار التكتوني الإقليمي لقوس الاندساس الهِلّيني في شرق البحر المتوسط، موضحًا موضع الخندق الهِلّيني جنوب كريت، وامتداد مقدمة المتوسط الرسوبية (Mediterranean Ridge)، والبنى التكتونية والفوالق المرتبطة بها، فضلًا

عن اتجاه حركة الصفيحة الإفريقية نحو الشمال إلى الشمال الشرقي. كما يبرز الشكل العلاقة المكانية بين هذا النظام الاندساسي وهامش سيرينايكا في شرق ليبيا، بما يسمح بقراءة الساحل الليبي الشرقي ضمن سياق جيوديناميكي إقليمي أوسع، لا بوصفه هامشًا معزولًا عن ديناميات شرق المتوسط.

شكل (1): الإطار التكتوني الإقليمي لقوس الاندساس الهِلّيني في شرق البحر المتوسط.



توضح الخريطة موقع الخندق الهِلّيني، ومقدمة المتوسط الرسوبية، والبنى التكتونية والفوالق الرئيسة والمستنتجة، واتجاه حركة الصفيحة الإفريقية نحو الشمال–الشمال الشرقي، إضافة إلى العلاقة المكانية بين القوس الهِلّيني وهامش سيرينايكا في شرق ليبيا.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على Reilinger et al. (2006)، Vernant et al. (2014)، Mascle and Chaumillon (1998)، Hayes et al. (2018)، وبيانات الأعماق البحرية GEBCO.

وترتبط ديناميات القوس الهِلّيني بآلية تراجع اللوح الغاطس (Slab Rollback)، التي تُعدّ من العمليات الجيوديناميكية الرئيسة المفسرة لتطور بحر إيجه الحديث وأحواض التمدد الخلفي المرتبطة به (Jolivet & Faccenna, 2000). فقد أدى استمرار اندساس اللوح الإفريقي وتراجعه جنوبًا إلى هجرة نسبية للخندق الهِلّيني، بالتزامن مع تمدد القشرة الإيجية وتكوّن أحواض خلف القوس، وهو ما نتج عنه نظام إجهادات إقليمي معقد يجمع بين الانضغاط أمام جبهة الاندساس، والتمدد داخل بحر إيجه، والقص الجانبي في القطاعات الانتقالية من شرق المتوسط (Le Pichon & Kreemer, 2010). وتنعكس هذه الديناميات في أنماط النشاط الزلزالي المتنوعة، بدءًا من الزلازل الضحلة المرتبطة بالبنية السطحية للخندق والقوس الأمامي، وصولًا إلى الزلازل المتوسطة والعميقة الناتجة عن انغراز اللوح الإفريقي داخل الوشاح العلوي (Hayes et al., 2018).

ورغم أن معظم الدراسات الجيوفيزيائية والزلزالية المتعلقة بالقوس الهِلّيني ركزت بصورة أساسية على جنوب اليونان وبحر إيجه والأناضول، فإن التأثيرات الجيوديناميكية الممتدة لهذا النظام على الهوامش الجنوبية لشرق المتوسط، وخاصة هامش سيرينايكا في شرق ليبيا، ما تزال أقل حضورًا في الأدبيات العلمية. وتكتسب هذه الإشكالية أهمية خاصة في ضوء الموقع المقابل لسيرينايكا بالنسبة إلى القطاع الأوسط من القوس الهِلّيني جنوب كريت، وارتباط الهامش الليبي الشرقي بمقدمة المتوسط الرسوبية والرف القاري الجنوبي للمتوسط. ومن ثم، فإن انتقال الإجهادات التكتونية عبر هذه البنى الإقليمية قد يمثل عاملًا مهمًا في فهم قابلية بعض الصدوع والبنى الموروثة في شرق ليبيا لإعادة التنشيط ضمن حقل إجهادات إقليمي متغير (Mascle & Chaumillon, 1998).

ويُعدّ السجل الزلزالي والتسونامي في شرق المتوسط مؤشرًا مهمًا على الترابط البنيوي بين القوس الهِلّيني والهوامش الجنوبية للحوض المتوسطي. فقد مثّل زلزال كريت العظيم سنة 365م أحد أعنف الأحداث الزلزالية–التسونامية في تاريخ المتوسط، إذ ارتبط بواجهة الاندساس الهِلّيني، وتسبب في موجات تسونامي واسعة النطاق وصلت آثارها إلى سواحل برقة والإسكندرية وأجزاء أخرى من شرق المتوسط (Stiros, 2010; Polonia et al., 2013). كما أن التسجيلات الزلزالية الحديثة في جنوب كريت، والبحر الأيوني، وبحر إيجه تؤكد استمرار فعالية النظام التكتوني للقوس الهِلّيني، وتدعم النظر إلى شرق المتوسط بوصفه بيئة جيوديناميكية نشطة قادرة على إنتاج أخطار زلزالية وتسونامية إقليمية.

وانطلاقًا من ذلك، تنطلق هذه الدراسة من فرضية مفادها أن قوس الاندساس الهِلّيني لا يمثل مجرد مصدر زلزالي إقليمي بعيد عن ليبيا، بل يشكل منظومة جيوديناميكية نشطة يمكن أن تؤثر، بصورة مباشرة أو غير مباشرة، في الاستقرار السيسموتكتوني لهامش سيرينايكا من خلال انتقال الإجهادات التكتونية، وإعادة تنشيط بعض البنى الصدعية الكامنة على الرف القاري الليبي، وزيادة قابلية الساحل الليبي الشرقي للتأثر بالمخاطر الزلزالية والتسونامية الإقليمية. وتهدف الدراسة

إلى تحليل العلاقة بين ديناميات الاندساس الهِلِّيني والاستقرار البنيوي لشرق ليبيا، وتفسير الكيفية التي تسهم بها عمليات الاندساس وتراجع اللوح الغاطس في إعادة تشكيل حقل الإجهادات الإقليمي وتأثيره المحتمل على الساحل الليبي الشرقي.

وتعتمد الدراسة على مقاربة جيوديناميكية–سيسمو-تكتونية تكاملية تستند إلى دمج بيانات هندسة اللوح الغاطس المستمدة من نموذج Slab2 (Hayes et al., 2018)، وقواعد بيانات الصدوع النشطة مثل GreDaSS وGEM-GAF، إضافة إلى السجل الزلزالي التاريخي والمعاصر المستمد من كتالوجات USGS وEMSC، وخرائط الخطر الزلزالي الإقليمية الحديثة ESHM20، وبيانات الأعماق البحرية والتضاريس الرقمية المستخلصة من GEBCO وEMODnet. ويغطي النطاق المكاني للدراسة قوس الاندساس الهِلِّيني ومقدمة المتوسط الرسوبية، وصولًا إلى هامش سيرينايكا والسواحل الشمالية الشرقية لليبيا، مع التركيز على مناطق درنة وسوسة وطبرق والجبل الأخضر بوصفها قطاعات ذات حساسية جيوديناميكية نسبية ضمن الهامش الليبي الشرقي.

وتكتسب الدراسة أهميتها من كونها تسعى إلى إعادة إدراج شرق ليبيا ضمن الإطار الجيوديناميكي النشط لشرق المتوسط، بدل التعامل معه بوصفه هامشًا مستقرًا نسبيًا ومعزولًا عن التأثيرات الإقليمية. كما توفر الدراسة أساسًا علميًا يمكن أن يسهم في دعم تقييم المخاطر الزلزالية والتسونامية، وتطوير سياسات التخطيط العمراني الساحلي، وتعزيز شبكات الرصد الزلزالي والجيوفيزيائي، بما يساعد على تقليل الهشاشة المستقبلية للسواحل الليبية الشمالية الشرقية أمام الأخطار الجيوديناميكية الإقليمية.

وتتوزع الورقة بعد هذه المقدمة على محاور تتناول الخلفية الجيوديناميكية الإقليمية، وهندسة قوس الاندساس واللوح الغاطس، والبنية السيسموتكتوني ة لسيرينايكا، والسجل الزلزالي والتسونامي في شرق المتوسط، وتحليل المخاطر السيسموتكتوني ة على الساحل الليبي الشرقي، وصولًا إلى مناقشة النتائج واستخلاص الاستنتاجات والتوصيات التطبيقية المرتبطة بإدارة المخاطر والتخطيط الساحلي.

2. الخلفية الجيوديناميكية الإقليمية

يُعد شرق البحر المتوسط أحد أكثر الأقاليم الجيوديناميكية تعقيدًا في العالم، إذ يتشكل بنيانه التكتوني من تفاعل مستمر بين الصفيحتين الإفريقية والأوراسية، وما يصاحب هذا التفاعل من اندساس محيطي، وتشوه قشري، وتمدد خلفي، وقص تحويلي، ونشاط زلزالي متعدد الأعماق. ولا يمثل هذا التفاعل حركة تقاربية بسيطة بين كتلتين صخريتين، بل نظامًا تكتونيًا مركبًا تتداخل فيه عدة آليات بنيوية على نطاق إقليمي واسع، في مقدمتها اندساس اللوح الإفريقي أسفل الكتلة الإيجية–الأوراسية، وتراجع اللوح الغاطس، وتمدد بحر إيجه، وإعادة توزيع الإجهادات نحو الهوامش الجنوبية للحوض المتوسطي (Reilinger et al., 2006; Le Pichon & Kreemer, 2010).

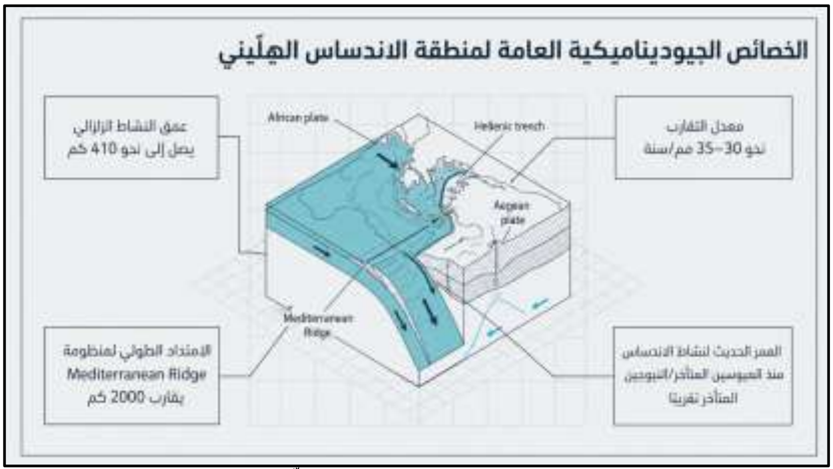
وتشير القياسات الجيوديسية الحديثة المعتمدة على تقنيات GPS إلى أن الصفيحة الإفريقية تتحرك عمومًا باتجاه الشمال إلى الشمال الشرقي نحو أوراسيا بمعدلات تقارب تقريبية تتراوح في شرق المتوسط بين نحو 4–10 ملم/سنة، مع تباينات مكانية واضحة ترتبط باختلاف هندسة مناطق الاندساس وطبيعة التشوه الإقليمي (Nocquet, 2012; Vernant et al., 2014).

غير أن ديناميات شرق المتوسط لا تُفهم من معدل تقارب إفريقيا–أوراسيا وحده، إذ تُظهر القياسات أن الكتلة الإيجية تتحرك بسرعة نسبية أكبر نحو الجنوب الغربي، وهو ما يعكس أثر تراجع اللوح الغاطس وتمدد بحر إيجه في إعادة تنظيم الحركة القشرية داخل هذا القطاع من المتوسط (McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006).

ويمثل قوس الاندساس الهِلِّيني التعبير البنيوي الأبرز عن هذا النظام، حيث يندفع اللوح الإفريقي المحيطي أسفل الحافة الجنوبية للكتلة الإيجية، مشكلًا خندقًا اندساسيًا نشطًا يمتد من غرب اليونان والبحر الأيوني، مرورًا بجنوب كريت، وصولًا إلى رودس والقطاع الانتقالي نحو القوس القبرصي. وقد أدى استمرار الاندساس إلى تشكل منظومة بنيوية متكاملة تضم الخندق الهِلِّيني، ومقدمة المتوسط الرسوبية (Mediterranean Ridge)، والنطاق الأمامي للقوس، وأحواض التمدد الخلفي في بحر إيجه (McKenzie, 1978; Le Pichon et al., 1979).

ويُظهر شكل (2) الخصائص الجيوديناميكية العامة لمنطقة الاندساس الهِلِّيني، من خلال تلخيص العلاقة بين اللوح الإفريقي الغاطس، والخندق الهِلِّيني، والكتلة الإيجية العلوية، ومقدمة المتوسط الرسوبية. كما يبرز الشكل عددًا من المؤشرات التقديرية المهمة، مثل عمق النشاط الزلزالي الذي قد يصل إلى نحو 410 كم داخل نطاق اللوح الغاطس، والامتداد الطولي لمنظومة مقدمة المتوسط الرسوبية الذي يقارب 2000 كم، فضلًا عن الإشارة إلى حداثة النشاط الاندساسي المرتبط بتطور النظام منذ الميوسين المتأخر/النيوجين المتأخر تقريبًا. أما معدل 30–35 مم/سنة فينبغي قراءته بوصفه مؤشرًا للحركة النسبية داخل النظام الإيجي–الهِلِّيني، ولا يُفهم على أنه معدل تقارب إفريقيا–أوراسيا المباشر، الذي يُقدَّر عادة بقيم أقل في شرق المتوسط.

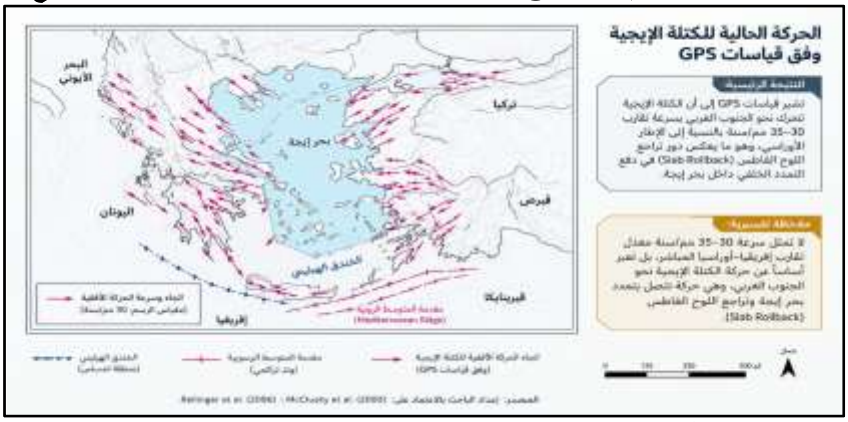
شكل (2): الخصائص الجيوديناميكية العامة لمنطقة الاندساس الهِلِّيني.



يوضح الشكل العلاقة العامة بين اللوح الإفريقي الغاطس، والخندق الهِلّيني، والكتلة الإيجية العلوية، ومقدمة المتوسط الرسوبية، مع إبراز مؤشرات تقريبية تتعلق بعمق النشاط الزلزالي، والامتداد البنيوي لمنظومة Mediterranean Ridge، والعمر الحديث لنشاط الاندساس. وتُقرأ القيم الرقمية الواردة في الشكل بوصفها مؤشرات تقريبية لا قيماً مطلقة.
المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على Mckenzie (1978), Le Pichon et al. (1979), Reilinger et al. (2006), Jolivet and Faccenna (2000), Hayes et al. (2018)

وتكتسب مقدمة المتوسط الرسوبية أهمية خاصة ضمن هذا النظام؛ فهي لا تمثّل مجرد تراكم رسوبي أمام جبهة الاندساس، بل تشكل إسفينًا تراكميًا واسعًا نتج عن ضغط الرواسب البحرية أمام اللوح الإفريقي المتحرك شمالًا. وتعمل هذه البنية بوصفها نطاقًا انتقاليًا بين واجهة الاندساس العميقة والهامش الجنوبي للمتوسط، الأمر الذي يجعلها عنصرًا مهمًا في تفسير كيفية توزيع الإجهادات التكتونية داخل شرق المتوسط، واحتمال انتقال بعض آثارها البنيوية نحو الهوامش الجنوبية، بما في ذلك هامش سيرينايكا الليبي (Mascle & Chaumillon, 1998; Kopf et al., 2003).
وترتبط ديناميات القوس الهِلّيني بصورة وثيقة بآلية تراجع اللوح الغاطس (Slab Rollback)، وهي العملية التي تفسر جانبًا كبيرًا من تطور بحر إيجه الحديث. فمع استمرار هبوط اللوح الإفريقي داخل الوشاح، تتراجع جبهة الاندساس نسبيًا نحو الجنوب، بينما تتمدد القشرة الإيجية في الخلف، منتجة أحواضًا تمددية وصدوعًا طبيعية ونظامًا إقليميًا معقدًا يجمع بين الانضغاط أمام القوس، والتمدد خلفه، والقص التحويلي في القطاعات الانتقالية (Jolivet & Faccenna, 2000; Royden & Papanikolaou, 2011).
ويُظهر شكل (3) الحركة الحالية للكتلة الإيجية وفق قياسات GPS، موضحًا اتجاه الحركة الجنوبية الغربية وعلاقتها بتمدّد بحر إيجه وتراجع اللوح الغاطس. وتكتسب هذه الحركة أهمية تفسيرية لأنها تكشف أن التشوه في شرق المتوسط لا ينتج عن التقارب الإفريقي–الأوراسي وحده، بل عن تفاعل أكثر تعقيدًا بين الاندساس، وتراجع الخندق، وتمدد القشرة الإيجية، وانتقال الحركة عبر منظومات الصدوع الإقليمية. ومن ثم، فإن حركة الكتلة الإيجية نحو الجنوب الغربي تمثل دليلًا جيوديسيًا مباشرًا على استمرار فعالية النظام الهِلّيني، وعلى أن شرق المتوسط ما يزال بيئة تكتونية نشطة قابلة لإعادة توزيع الإجهادات على نطاق واسع.

شكل (3): الحركة الحالية للكتلة الإيجية وفق قياسات GPS وعلاقتها بتمدد بحر إيجه وتراجع اللوح الغاطس.



يوضح الشكل اتجاهات الحركة الأفقية للكتلة الإيجية نحو الجنوب الغربي، وعلاقتها بآلية تراجع اللوح الغاطس (Slab Rollback) وتمدد بحر إيجه. ولا تمثل سرعة 30–35 مم/سنة معدل تقارب إفريقيا–أوراسيا المباشر، بل تعبر أساسًا عن الحركة النسبية للكتلة الإيجية ضمن نظام التمدد الخلفي.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على McClusky et al. (2000)، Reilinger et al. (2006)، Nocquet (2012)، Le Pichon and Kreemer (2010).

وترتبط هذه الديناميات بصورة مباشرة بالنشاط الزلزالي في شرق المتوسط، إذ تؤدي التغيرات المستمرة في هندسة اللوح الغاطس ومستوى الاقتران بين الصفائح إلى تراكم الإجهادات وإطلاقها عبر زلازل متفاوتة الأعماق والآليات الحركية. ففي حين ترتبط الزلازل الضحلة بعمليات التشوه القشري والصدوع السطحية داخل بحر إيجه والقطاع الأمامي للقوس، تنتج الزلازل المتوسطة والعميقة عن انغراز اللوح الإفريقي داخل الوشاح على طول نطاق Wadati–Benioff (Papazachos & Comninakis, 1971; Hayes et al., 2018). وهذا التعدد في الأعماق والآليات الزلزالية يعكس الطبيعة المركبة لمنظومة الاندساس الهِلّيني، ويؤكد أنها ليست بنية جيولوجية ساكنة، بل نظام نشط تتجدد داخله عمليات التشوه والتحرر الزلزالي.

ومن منظور جيوديناميكي إقليمي، لا تقتصر أهمية هذا النظام على تفسير النشاط الزلزالي في جنوب اليونان وبحر إيجه فقط، بل تمتد إلى فهم علاقته بالهوامش الجنوبية لشرق المتوسط. فاستمرار الاندساس وتراجع اللوح الغاطس وتراكم الرواسب المنضغطة في مقدمة المتوسط كلها عوامل تسهم في إعادة توزيع الإجهادات على نطاق واسع. ومن ثم، يصبح هامش سيرينايكا والساحل الليبي الشرقي جزءًا من مجال تأثر غير مباشر بديناميات القوس الهِلّيني، لا من حيث وقوعه داخل نطاق الاندساس نفسه، بل من حيث قابليته للتأثر بالإجهادات الإقليمية المنقولة عبر الحوض المتوسطي والرف القاري الجنوبي (Mascle & Chaumillon, 1998; Le Pichon & Kreemer, 2010).

وعليه، فإن فهم الخلفية الجيوديناميكية لشرق المتوسط يمثل مدخلًا ضروريًا لتفسير الاستقرار السيسموتكتوني لشرق ليبيا. فالقوس الهِلّيني، بما يتضمنه من لوح غاطس، وخندق نشط، ومقدمة رسوبية مضغوطة، وحركة نسبية للكتلة الإيجية، يشكل منظومة إقليمية قادرة على إنتاج زلازل قوية وتسونامي عابر للحوض، كما يوفر الإطار البنيوي اللازم لفهم احتمالية إعادة تنشيط بعض البنى الصدعية الموروثة في هامش سيرينايكا تحت تأثير تغيرات حقل الإجهادات الإقليمي.

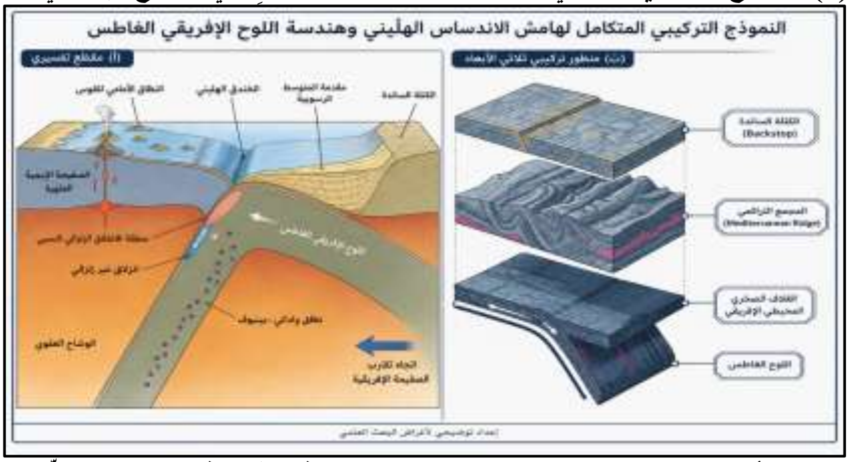
3. هندسة قوس الاندساس واللوح الغاطس

تُعد هندسة اللوح الإفريقي الغاطس أسفل قوس الاندساس الهِلّيني من العناصر الحاسمة في تفسير السلوك الجيوديناميكي والنشاط السيسموتكتوني في شرق البحر المتوسط؛ إذ تتحكم خصائص هذا اللوح في توزيع الإجهادات، وتدرج الأعماق الزلزالية، وطبيعة التشوه البنيوي المرتبط بمنطقة الاندساس. وتشير النماذج الجيوفيزيائية الحديثة إلى أن اللوح الإفريقي ينغرز أسفل الكتلة الإيجية–الأوراسية بزوايا ميل متفاوتة مكانيًا، مع ازدياد عمقه تدريجيًا باتجاه الشمال أسفل بحر إيجه، حيث تنتظم الزلازل المتوسطة والعميقة على طول نطاق واداتي–بينيوف (Wadati–Benioff Zone)، بما يعكس استمرار انغراز اللوح داخل الوشاح العلوي (Papazachos & Comninakis, 1971; Hayes et al., 2018).

ويقدّم شكل (4) نموذجًا تفسيريًا–تركيبيًا متكاملًا لهندسة هامش الاندساس الهِلّيني واللوح الإفريقي الغاطس. ويجمع الشكل بين مستويين من التمثيل العلمي؛ إذ يعرض الجزء (أ) مقطعًا تفسيريًا يبيّن العلاقة بين اتجاه تقارب الصفيحة الإفريقية، والخندق الهِلّيني، ومقدمة المتوسط الرسوبية، ومنطقة الانغلاق الزلزالي النسبي، والانزلاق غير الزلزالي، ونطاق واداتي–بينيوف المرتبط بتوزيع الزلازل المتوسطة والعميقة. أما الجزء (ب) فيعرض منظورًا تركيبيًا ثلاثي الأبعاد يوضح البنية العامة لهامش الاندساس، بما في ذلك الكتلة الساندة، والمجمع التراكمي، والغلاف الصخري المحيطي الإفريقي، واللوح

الغاطس. وتكمن أهمية هذا الشكل في أنه لا يكتفي بإظهار اللوح الإفريقي بوصفه جسمًا غاطسًا، بل يربط بين هندسته العميقة، والبنى السطحية المصاحبة له، وآليات تراكم الإجهادات وإطلاقها داخل النظام الهِلّيني.

شكل (4): نموذج تفسيري–تركيبي لهندسة هامش الاندساس الهِلّيني واللوح الإفريقي الغاطس.



يوضح الشكل في الجزء (أ) مقطعًا تفسيريًا يبيّن اتجاه تقارب الصفيحة الإفريقية، والخندق الهِلّيني، ومقدمة المتوسط الرسوبية، ومنطقة الانغلاق الزلزالي النسبي، والانزلاق غير الزلزالي، ونطاق واداتي–بينيوف، بينما يوضح الجزء (ب) البنية التركيبية ثلاثية الأبعاد لهامش الاندساس، بما في ذلك الكتلة الساندة، والمجمع التراكمي، والغلاف الصخري المحيطي الإفريقي، واللوح الغاطس.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على Le Pichon and Angelier (1979)، Papazachos and Comninakis (1971)، Mascle and Chaumillon (1998)، Jolivet and Faccenna (2000)، Hayes et al. (2018).

ولا تتسم هندسة اللوح الغاطس بالتجانس على امتداد القوس الهِلّيني، بل تختلف من قطاع إلى آخر تبعًا لاختلاف زاوية الانغراز، ومستوى الاقتران بين الصفائح، وطبيعة التشوه الإقليمي. فالقطاع الغربي، الممتد في اتجاه البحر الأيوني وغرب اليونان، يرتبط غالبًا بتداخل بين الانضغاط والقص الجانبي، في حين يمثل القطاع الأوسط جنوب كريت أكثر أجزاء القوس وضوحًا من حيث الاندساس النشط والاقتران التكتوني النسبي، وهو ما يجعله أكثر قابلية لتراكم الإجهادات وتوليد الزلازل الكبرى والتسونامي. أما القطاع الشرقي، الممتد نحو رودس والانتقال إلى القوس القبرصي، فيتسم بدرجة أعلى من التعقيد البنيوي نتيجة تداخل الاندساس مع القص التحويلي والتمدد الإقليمي (Kiratzi & Louvari, 2003; Hayes et al., 2018).

ويرتبط هذا التباين القطاعي مباشرة بتوزيع النشاط الزلزالي في شرق المتوسط؛ إذ تتركز الزلازل الضحلة غالبًا على طول الخندق الهِلّيني والنطاق الأمامي للقوس، بينما تتوزع الزلازل المتوسطة والعميقة داخل اللوح الإفريقي الغاطس على امتداد نطاق واداتي–بينيوف. ويعكس هذا النمط الزلزالي استمرار التفاعل بين اللوح الغاطس والكتلة العلوية، كما يوضح أن القوس الهِلّيني ليس بنية تكتونية ساكنة، بل نظام نشط تتجدد داخله عمليات تراكم الإجهادات وإطلاقها عبر زلازل متفاوتة الأعماق والآليات الحركية. ومن هنا تبرز أهمية منطقة الانغلاق الزلزالي النسبي الموضحة في شكل (4)، لأنها تمثل نطاقًا يمكن أن تتراكم فيه الإجهادات على واجهة التلامس بين اللوحين قبل تحررها في صورة زلازل قوية، في حين يشير الانزلاق غير الزلزالي إلى أجزاء من الواجهة قد تتحرر فيها الحركة تدريجيًا دون توليد زلازل كبيرة (Papazachos & Comninakis, 1971; Hayes et al., 2018).

كما ترتبط هندسة اللوح الغاطس بمستوى الاقتران بين الصفائح، وهو عامل أساسي في تقدير قابلية منطقة الاندساس لتوليد الزلازل الكبرى والتسونامي. ففي القطاعات التي يرتفع فيها مستوى الاقتران، ولا سيما جنوب كريت، يمكن أن تتراكم الإجهادات على واجهة التلامس بين اللوحين الإفريقي والإيجي لفترات طويلة قبل أن تتحرر في صورة زلازل قوية مرتبطة بالاندساس. ويُعد زلزال كريت العظيم سنة 365م أحد أبرز الأمثلة التاريخية على قدرة هذا النظام على إنتاج حدث زلزالي–تسونامي واسع التأثير في شرق المتوسط (Stiros, 2010; Polonia et al., 2013).

ومن منظور إقليمي، لا تقتصر أهمية هندسة اللوح الغاطس على تفسير النشاط الزلزالي داخل القوس الهِلّيني نفسه، بل تمتد إلى فهم كيفية إعادة توزيع الإجهادات نحو الهوامش الجنوبية لشرق المتوسط، بما في ذلك هامش سيرينايكا الليبي. فاختلاف زاوية ميل اللوح، ومستوى تراجعه، وطبيعة الاقتران بين الصفائح، وتطور مقدمة المتوسط الرسوبية، كلها عوامل تؤثر في تنظيم حقل الإجهادات الإقليمي، وقد تسهم بصورة غير مباشرة في إعادة تنشيط بعض البنى الصدعية الموروثة داخل شرق ليبيا أو في الرف القاري المجاور لها (Mascle & Chaumillon, 1998; Le Pichon & Kreemer, 2010).

ولتوضيح هذا التباين البنيوي والسيسموتكتوني بين قطاعات القوس، يوجز الجدول (1) الخصائص الرئيسة لكل قطاع من حيث هندسة اللوح الغاطس، والعمق الزلزالي التقريبي، ونوع التشوه السائد، والدلالة المرتبطة بالمخاطر الزلزالية والتسونامية.

جدول (1): خصائص قطاعات قوس الاندساس الهِلّيني ودلالاتها السيسموتكتوني ة

القطاع	هندسة اللوح الغاطس	العمق الزلزالي التقريبي	نوع التشوه السائد	الدلالة على المخاطر
القطاع الغربي: الأيوني–غرب اليونان	لوح إفريقي غاطس بزاوية مائلة نسبيًا، مع ارتباط واضح بمنطقة الخندق الهليني والبحر الأيوني	زلازل ضحلة إلى متوسطة، وقد تمتد بعض البؤر إلى أعماق أكبر ضمن نطاق Wadati–Benioff	انضغاط أساسي مع مكون قص جانبي وتحولات محلية مرتبطة بانتقال الحركة بين اليونان والبحر الأيوني	مصدر مهم للزلازل الإقليمية، وقد يسهم في نقل الإجهادات نحو الحوض الأيوني والهامش الجنوبي للمتوسط
القطاع الأوسط: جنوب كريت	أكثر قطاعات القوس وضوحًا من حيث الاندساس النشط، مع اقتران أقوى نسبيًا بين اللوح الإفريقي والكتلة الإيجية	زلازل ضحلة ومتوسطة وعميقة نسبيًا، مع امتداد النشاط الزلزالي داخل اللوح الغاطس إلى أعماق كبيرة قد تتجاوز 150–180 كم	انضغاط واندساس نشط، مع تراجع للوح الغاطس وتمدد خلفي داخل بحر إيجه	يمثل القطاع الأهم في توليد الزلازل الكبرى والتسونامي، ويرتبط تاريخيًا بزلازل كريت 365م وتأثيراته الواسعة على شرق المتوسط
القطاع الشرقي: رودس–الانتقال نحو القوس القبرصي	هندسة أكثر تعقيدًا نتيجة الانتقال بين القوس الهليني والقوس القبرصي وتداخل الاندساس مع القص والتحول البنيوي	زلازل ضحلة إلى متوسطة غالبًا، مع تباين مكاني في الأعماق نتيجة تعقد البنية التكتونية	قص تحويلي، وانضغاط موضعي، وتشوه انتقالي بين نظامي الاندساس الهليني والقبرصي	يزيد من تعقيد حقل الإجهادات في شرق المتوسط، وقد يؤثر في توزيع الزلازل الإقليمية ومسارات انتقال الإجهادات نحو الجنوب والجنوب الشرقي
مقدمة المتوسط الرسوبية Mediterranean Ridge	ليست قطاعًا من اللوح الغاطس مباشرة، بل تمثل وتدًا تراكميًا رسوبيًا أمام جبهة الاندساس	زلازل ضحلة غالبًا مرتبطة بالتشوه الرسوبي والصدوع الدفعية	طيات انضغاطية، صدوع دفعية، وتشوه رسوبي واسع	تعمل كمنطقة وسيطة في توزيع الإجهادات بين القوس الهليني والهامش الجنوبية للمتوسط، بما في ذلك هامش سيرينايكا الليبي

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على Papazachos and Comninakis (1971), Kiratzi and Louvari (2003), Polonia et .al. (2013), Hayes et al. (2018)

4. سيرينايكا والبنية السيسموتكتوني ة

يمثل هامش سيرينايكا والساحل الشمالي الشرقي لليبيا جزءًا من الهامش الجنوبي لشرق البحر المتوسط، ويتميز ببنية جيولوجية معقدة تعكس تداخل التطور الرسوبي طويل الأمد مع التأثيرات التكتونية الإقليمية المرتبطة بتقارب إفريقيا–أوراسيا.
ورغم أن شرق ليبيا يُصنَّف عادة ضمن المناطق ذات النشاط الزلزالي المنخفض إلى المتوسط مقارنة بالنطاقات الأعلى نشاطًا في جنوب اليونان وبحر إيجه والأناضول، فإن موقع سيرينايكا المقابل للقطاع الأوسط من قوس الاندساس الهِلّيني، كما يوضحه شكل (1)، يجعلها ضمن مجال التأثر غير المباشر بديناميات شرق المتوسط، ولا سيما عبر مقدمة المتوسط الرسوبية والرف القاري الجنوبي للحوض المتوسطي (Mascle & Chaumillon, 1998).
وتكتسب سيرينايكا أهميتها السيسموتكتوني ة من كونها ليست هامشًا قارّيًا بسيطًا أو ساكنًا بالكامل، بل إقليمًا بنيويًا ارتبط تاريخه الجيولوجي بمراحل متعاقبة من الترسيب البحري، والرفع البنيوي، والانكسار، وإعادة تنشيط بعض البنى الموروثة.
وتُعد هضبة الجبل الأخضر أبرز تعبير مورفولوجي وبنيوي عن هذا التاريخ، إذ تمثل كتلة كربوناتية مرتفعة تعرضت خلال مراحل تطورها الجيولوجي لسلسلة من عمليات الرفع والتشوه والانكسار منذ الميسوزوي وحتى الزمن الحديث (El-Hawat & Shelmani, 1993). ولا ينبغي النظر إلى هذا الارتفاع الطبوغرافي بوصفه ظاهرة تضاريسية فقط، بل بوصفه مؤشرًا على تاريخ بنيوي طويل جعل الإقليم أكثر قابلية للتفاعل مع تغيرات حقل الإجهادات الإقليمي.
وتشير الدراسات البنيوية إلى وجود منظومات صدعية موروثة داخل شرق ليبيا تعود إلى مراحل تكتونية قديمة مرتبطة بتطور الهامش الشمالي لإفريقيا وانفتاح حوض التيثس وتطور أحواض شرق المتوسط (Guiraud & Bosworth, 1997). وتشمل هذه البنى صدوعًا طولية ومائلة واتجاهات انكسارية متباينة، يرتبط بعضها بالحافات البنيوية للجبل الأخضر، بينما يمتد بعضها الآخر نحو الرف القاري والمنحدر البحري شمال سيرينايكا. ورغم أن كثيرًا من هذه الصدوع يُعد قديمًا أو منخفض النشاط في الوقت الحاضر، فإن وجودها داخل مجال إقليمي متأثر بإعادة توزيع الإجهادات يجعل احتمالية إعادة تنشيط بعضها أمرًا واردًا من الناحية السيسموتكتوني ة، خاصة عند تعرضها لإجهادات إقليمية متكررة أو طويلة الأمد.
وترتبط البنية السيسموتكتوني ة لسيرينايكا أيضًا بتدرج مورفولوجي واضح بين الهضبة الكربوناتية المرتفعة للجبل الأخضر، والسهل الساحلي الضيق نسبيًا، والمنحدر القاري الممتد شمالًا نحو الحوض المتوسطي. ويعكس هذا التدرج أثر الرفع البنيوي والتشوه التكتوني في تشكيل الإقليم، كما يمنح بعض القطاعات الساحلية حساسية أعلى تجاه الاهتزازات الزلزالية أو التأثيرات الثانوية المرتبطة بالأمواج العالية والتسونامي، خاصة في المناطق التي تجمع بين الانحدارات الحادة والقرب العمراني من الساحل (El-Hawat & Shelmani, 1993; Guiraud & Bosworth, 1997).
ومن منظور جيوديناميكي، لا تُفسَّر سيرينايكا بوصفها نطاق اندساس مباشر، بل باعتبارها هامشًا قارّيًا جنوبيًا يتأثر بصورة غير مباشرة بمنظومة الاندساس الهِلّيني. فكما يوضح الشكلان (1) و(4)، يقع الهامش الليبي الشرقي إلى الجنوب من منظومة تتضمن الخندق الهِلّيني، ومقدمة المتوسط الرسوبية، واللوح الإفريقي الغاطس أسفل الكتلة الإيجية. وتُعد مقدمة المتوسط الرسوبية في هذا السياق بنية وسيطة مهمة؛ إذ يمكن أن تسهم في إعادة توزيع الإجهادات بين واجهة الاندساس العميقة والهوامش الجنوبية للحوض، بما في ذلك الرف القاري لسيرينايكا (Mascle & Chaumillon, 1998; Le Pichon & Kreemer, 2010).

وتظهر أهمية هذا الترابط الإقليمي في أن تأثير القوس الهِلّيني على سيرينايكا لا ينبغي فهمه بوصفه علاقة مباشرة أو ميكانيكية بسيطة، بل بوصفه تأثيرًا جيوديناميكيًا غير مباشر يتشكل عبر الزمن من خلال انتقال الإجهادات، وتغير هندسة اللوح الغاطس، وتراجع الخندق، وتطور مقدمة المتوسط الرسوبية. ومن ثم فإن البنى الصدعية الموروثة في الجبل الأخضر والرف القاري الشرقي لا تُعد بالضرورة ناتجة مباشرة عن الاندساس الهِلّيني، لكنها قد تكون قابلة لإعادة التنشيط جزئيًا ضمن حقل إجهادات إقليمي أوسع مرتبط بتقارب إفريقيا–أوراسيا وديناميات شرق المتوسط.

وتُظهر البيانات الزلزالية الحديثة أن شرق ليبيا يشهد نشاطًا زلزاليًا محدودًا نسبيًا مقارنة بجنوب اليونان وبحر إيجه، إلا أن هذا الضعف النسبي في معدل الزلازل لا يعني غياب الحساسية السيسموتكتوني ة. فبعض الأحداث الزلزالية المسجلة في محيط الجبل الأخضر والبحر الأيوني وشرق المتوسط تشير إلى وجود بيئة إجهادات فعّالة إقليميًا، وإن كانت أقل كثافة من النطاقات القريبة من واجهة الاندساس (EMSC, 2024). وتتميز معظم هذه الأحداث بكونها ضعيفة إلى متوسطة الشدة، لكنها تظل مهمة لأنها تكشف أن الهامش الليبي الشرقي ليس منفصلًا تمامًا عن المجال الزلزالي الإقليمي.

ويرتبط تقييم الاستقرار السيسموتكتوني لسيرينايكا كذلك بطبيعة البنية الرسوبية والكربوناتية للإقليم. فالتراكيب الكارستية، والفواصل الصخرية، والصدوع القديمة، والمنحدرات الساحلية قد تؤدي إلى تضخيم التأثيرات الزلزالية محليًا أو زيادة قابلية بعض المواقع للتأثر بالانهيارات الصخرية والاهتزازات الأرضية. وتزداد أهمية هذا العامل في ظل التوسع العمراني في مدن مثل درنة، والبيضاء، وسوسة، وطبرق، حيث تتركز بعض التجمعات السكانية والبنية التحتية قرب الساحل أو على مقربة من حافات تضاريسية وبنيوية حساسة.

ومن ثم، فإن فهم البنية السيسموتكتوني ة لسيرينايكا لا يقتصر على توصيف الصدوع المحلية أو تعداد الأحداث الزلزالية المسجلة داخل شرق ليبيا، بل يتطلب قراءة الإقليم ضمن الإطار الجيوديناميكي الأوسع لشرق المتوسط. فالهامش الليبي الشرقي يمثل نطاقًا منخفضًا إلى متوسط الحساسية السيسموتكتوني ة، يتأثر بدرجات متفاوتة بديناميات الاندساس الهِلّيني، وتراجع اللوح الغاطس، وإعادة توزيع الإجهادات عبر مقدمة المتوسط الرسوبية. ويعني ذلك أن الاستقرار البنيوي لشرق ليبيا ينبغي أن يُفسَّر بوصفه استقرارًا نسبيًا، لا استقرارًا مطلقًا، وأن تقييم المخاطر المستقبلية في سيرينايكا يستلزم الجمع بين دراسة البنية المحلية وتحليل النظام التكتوني الإقليمي المحيط بها.

5. الزلازل والتسونامي في شرق المتوسط

يُعد قوس الاندساس الهِلّيني أحد أكثر النطاقات السيسموتكتوني ة نشاطًا في البحر المتوسط، نتيجة استمرار اندساس اللوح الإفريقي أسفل الكتلة الإيجية–الأوراسية، وما يرتبط بذلك من تراكم دوري للإجهادات التكتونية وإطلاقها في صورة زلازل متفاوتة الأعماق والآليات. ويتسم النشاط الزلزالي المرتبط بهذا النطاق بتنوع واضح في الأعماق والآليات الحركية؛ إذ يشمل زلازل ضحلة مرتبطة بالخندق الهِلّيني والنطاق الأمامي للقوس والصدوع القشرية داخل بحر إيجه، إلى جانب زلازل متوسطة وعميقة ناتجة عن انغراز اللوح الإفريقي داخل الوشاح العلوي على امتداد نطاق واداتي–بينيوف (Wadati–Benioff Zone). ويعكس هذا التدرج في الأعماق استمرار فعالية نظام الاندساس، كما يبرز الدور المركزي لهندسة اللوح الغاطس في تنظيم النشاط الزلزالي داخل شرق المتوسط (Papazachos & Comninakis, 1971; Hayes et al., 2018).

وقد شهد شرق المتوسط عبر تاريخه عددًا من الأحداث الزلزالية والتسونامية الكبرى المرتبطة بصورة مباشرة أو غير مباشرة بمنظومة القوس الهِلّيني. ويُعد زلزال كريت العظيم سنة 365م من أبرز هذه الأحداث، إذ يُرجح أنه ارتبط بانزلاق كبير على واجهة الاندساس جنوب غرب كريت، وتجاوزت شدته التقديرية Mw 8.0 وفق عدد من الدراسات التاريخية والجيولوجية (Stiros, 2010). وقد تسبب هذا الحدث في رفع ساحلي واسع النطاق في جزيرة كريت، وفي توليد موجات تسونامي اجتاحت أجزاء واسعة من شرق المتوسط، ووصلت آثارها إلى السواحل الليبية والمصرية وبلاد الشام، مما يجعله شاهدًا تاريخيًا مهمًا على قدرة النظام الهِلّيني على إنتاج أخطار عابرة للأحواض البحرية (Polonia et al., 2013).

ولا تقتصر أهمية زلزال كريت سنة 365م على كونه حدثًا تاريخيًا استثنائيًا، بل تكمن قيمته العلمية في إبرازه قدرة الأحداث الزلزالية الكبرى الواقعة على الهامش الشمالي للحوض المتوسطي على التأثير في سواحله الجنوبية، ولا سيما برقة والساحل الليبي الشرقي. فالتسونامي الناتج عن مثل هذه الأحداث لا يتقيد بالحدود السياسية أو بالقرب المكاني المباشر من مركز الزلزال، بل ينتشر داخل حوض بحري شبه مغلق، تتدخل مورفولوجيته وأعماقه وشكل رفوفه القارية في توجيه الموجات وتضخيمها محليًا عند وصولها إلى بعض القطاعات الساحلية. ومن ثم، فإن دراسة أثر زلزال كريت سنة 365م تمثل مدخلًا مهمًا لفهم قابلية السواحل الليبية الشرقية للتأثر بالأحداث الزلزالية–التسونامية الإقليمية.

كما تعزز الأحداث اللاحقة، مثل زلزال 1303م في شرق المتوسط، وزلزال أمورغوس سنة 1956م في جنوب بحر إيجه، فكرة استمرار النشاط التكتوني داخل النظام الهِلّيني–الإيجي وقدرته على توليد زلازل قوية وموجات تسونامي محلية أو إقليمية (Papadopoulos, 2009). ولا ينبغي النظر إلى هذه الأحداث بمعزل عن التاريخ الزلزالي المحلي لسيرينايكا؛ إذ يشير زلزال قورينا/البنتابوليس سنة 262م، وكذلك زلزال المرج سنة 1963م، إلى أن شرق ليبيا نفسه يحتوي على بنى

صدعية محلية أو موروثة قابلة لإطلاق نشاط زلزالي، وإن كان ذلك ضمن مستوى أقل كثافة مقارنة بجنوب اليونان وبحر إيجه.
وتعرض الخريطة التاريخية في شكل (5) التوزيع المكاني للأحداث الزلزالية والتسونامية الرئيسة ذات الصلة بشرق ليبيا ونطاق القوس الهِلّيني، مع إبراز الخندق الهِلّيني بوصفه العنصر البنيوي الأهم في توليد عدد من الأحداث الزلزالية الكبرى في شرق المتوسط. وتكمن أهمية هذا الشكل في أنه يربط بصريًا بين مصادر الخطر الإقليمي شمال الحوض المتوسطي، ولا سيما جنوب كريت وشرق القوس، وبين مناطق التأثر المحتملة على الهوامش الجنوبية، خاصة سيرينايكا والساحل الليبي الشرقي. كما يميز الشكل بين الأحداث ذات الطبيعة الإقليمية المرتبطة بالقوس الهِلّيني، مثل زلزال كريت 365م وزلزال 1303م، وبين الأحداث المحلية داخل شرق ليبيا، مثل زلزال المرج 1963م، بما يدعم قراءة المخاطر الزلزالية والتسونامية من منظور يجمع بين المصدر المحلي والمصدر الإقليمي.

شكل (5): السجل الزلزالي التاريخي والتسونامي المؤثر على شرق ليبيا في نطاق قوس الاندساس الهِلّيني.

توضح الخريطة الموقع النسبي لأبرز الأحداث الزلزالية التاريخية ذات الصلة بشرق ليبيا وشرق المتوسط، بما في ذلك زلزال قورينا/البنتابوليس سنة 262م، وزلزال كريت العظيم سنة 365م، وزلزال 1303م، وزلزال أمورغوس سنة 1956م، وزلزال المرج سنة 1963م، مع إبراز الخندق الهِلّيني ومسارات التأثر التسونامي المحتملة نحو السواحل الجنوبية للحوض المتوسطي.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على Ambraseys (2009), Stiros (2010), Papadopoulos (2009), Polonia et al. (2013) وبيانات الخرائط الطبوغرافية–البحرية لشرق المتوسط.

ويبين الجدول (2) السجل التاريخي لأبرز الأحداث الزلزالية والتسونامية الكبرى ذات الصلة بشرق ليبيا ونطاق القوس الهِلّيني، مع توضيح طبيعة كل حدث ودلالته التكتونية. وتكمن أهمية هذا الجدول في أنه يركز على الأحداث العظمى التي تركت أثرًا إقليميًا واضحًا أو ارتبطت بتحولات زلزالية وتسونامية مؤثرة، مثل زلزال كريت سنة 365م، وزلزال 1303م، وزلزال أمورغوس 1956م، إضافة إلى الأحداث المحلية الدالة داخل سيرينايكا مثل زلزال المرج 1963م.

جدول (2): السجل التاريخي للأحداث الزلزالية والتسونامية الكبرى ذات الصلة بشرق ليبيا والقوس الهِلّيني ودلالاتها التكتونية

الحدث / التاريخ	الموقع أو المجال المتأثر	الخصائص والأثر الرئيس	الصلة بشرق ليبيا	الدلالة التكتونية
زلزال 262م	إقليم المدن الخمس (قورينا/البنتابوليس)	حدث تاريخي مدمر أثّر في قورينا ومحيطها، ويرتبط بسجل زلزالي مبكر في برقة	يمثل دليلا على قابلية إقليم برقة للتأثر بالنشاط الزلزالي منذ العصور القديمة	يشير إلى وجود بنى محلية أو إقليمية قابلة لإطلاق نشاط زلزالي داخل هامش سيرينايكا
زلزال كريت العظيم 365م	جنوب غرب كريت وشرق البحر المتوسط	زلزال كبير جدًا (أكثر من 8 درجات تقديرًا) أعقبه تسونامي واسع النطاق ورفع ساحلي في كريت	وصلت آثار التسونامي إلى السواحل الليبية، ويُعد أبرز دليل تاريخي على تأثر شرق ليبيا بأحداث إقليمية كبرى	يرتبط مباشرة بواجهة الاندساس الهِلّيني ويؤكد قدرة القوس على توليد أخطار زلزالية–تسونامية عابرة للحوض
زلزال 1303م	شرق المتوسط، خاصة كريت–الإسكندرية	حدث زلزالي كبير ارتبط بتسونامي إقليمي مؤثر في السواحل الشرقية والجنوبية للمتوسط	يعزز احتمال تعرض الساحل الليبي الشرقي لتأثيرات احداث إقليمية شبيهة	يدعم استمرارية النشاط التكتوني على طول القوس الهِلّيني وواجهة الاندساس
زلزال أمورغوس 1956م	جنوب بحر إيجه	زلزال قوي أعقبه تسونامي محلي/إقليمي، ويُعد من أبرز أحداث القرن العشرين في المجال الإيجي	يمثل دليلا حديثًا نسبيًا على استمرار قدرة النظام الإيجي–الهِلّيني على إنتاج تسونامي	يعكس استمرار فعالية النظام السيسمو–تكتوني المرتبط بتمدد بحر إيجه والقوس الهِلّيني
زلزال المرج 1963م	المرج – شرق ليبيا	زلزال محلي مدمر نسبيًا داخل برقة، أدى إلى خسائر بشرية ومادية كبيرة	يمثل أهم مثال حديث على قابلية البنى المحلية في شرق ليبيا لإنتاج زلازل مؤثرة	يرتبط بإعادة تنشيط بنى صدعية محلية أو موروثة ضمن هامش سيرينايكا

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على Ambraseys (2009), Papadopoulos (2009), Stiros(2010), Polonia et al. (2013)

وترتبط قابلية شرق المتوسط لتوليد موجات تسونامي بعدة عوامل جيوديناميكية ومورفولوجية، من أهمها ضخامة الزلازل المرتبطة بواجهة الاندساس، ووجود مكونات انزلاق عمودية قادرة على إزاحة قاع البحر، فضلًا عن احتمالية حدوث

انهيارات رسوبية تحت بحرية في مناطق المنحدرات القارية ومقدمة المتوسط الرسوبية نتيجة الاهتزازات الزلزالية (Piper & Perissoratis, 2003). كما أن الطبيعة شبه المغلقة للحوض المتوسطي، وتباين أعماقه، وتعرج السواحل، واختلاف اتساع الرفوف القارية، كلها عوامل قد تؤثر في اتجاه انتشار الموجات وسرعتها ومستوى تضخيمها عند وصولها إلى السواحل.

وفي هذا السياق، يكتسب الساحل الليبي الشرقي أهمية خاصة؛ فرغم أن شرق ليبيا لا يقع داخل نطاق الاندساس المباشر، فإن موقعه المقابل للقطاع الأوسط من القوس الهِلّيني جنوب كريت، وارتباطه بالرف القاري الجنوبي للحوض المتوسطي، يجعلان منه مجالًا قابلًا للتأثر بالأحداث الزلزالية والتسونامية الكبرى في شرق المتوسط. وتزداد هذه الحساسية في بعض المدن الساحلية مثل درنة وسوسة وطبرق، حيث تتداخل الخصائص المورفولوجية للساحل مع تمركز العمران والبنية التحتية بالقرب من البحر، الأمر الذي قد يرفع مستوى الهشاشة أمام الأمواج العالية أو الاهتزازات الزلزالية الإقليمية.

ولا يقتصر الدليل على فعالية القوس الهِلّيني على السجل التاريخي القديم؛ إذ تؤكد التسجيلات الزلزالية الآلية الحديثة استمرار النشاط السيسموتكتوني في جنوب كريت، والبحر الأيوني، وبحر إيجه، وقطاع رودس–كوس. وتدل هذه الأحداث الحديثة، وإن كان معظمها متوسط الشدة، على أن النظام الهِلّيني ما يزال في حالة نشاط مستمر، وأن عمليات الاندساس وتراجع اللوح الغاطس وتراكم الإجهادات على واجهة التلامس بين اللوحين الإفريقي والإيجي ما تزال فاعلة في تنظيم الزلزالية الإقليمية (EMSC, 2024; USGS, 2024).

أما الجدول (3) فيعرض نماذج مختارة من النشاط الزلزالي الحديث المسجل آليًا في نطاق القوس الهِلّيني وشرق المتوسط، اعتمادًا على قواعد بيانات USGS وEMSC. ولا يهدف الجدول إلى حصر جميع الزلازل الحديثة، بل إلى تقديم عينة دالة تؤكد استمرار النشاط السيسموتكتوني في جنوب كريت، والبحر الأيوني، وبحر إيجه، وقطاع رودس–كوس، بما يدعم النظر إلى القوس الهِلّيني بوصفه نظامًا نشطًا لا يزال قادرًا على توليد زلازل متوسطة إلى قوية.

جدول (3): نماذج مختارة من النشاط الزلزالي الحديث المسجل آليًا في نطاق القوس الهِلّيني وشرق المتوسط

التاريخ	الموقع التقريبي	القوة	العمق التقريبي	المصدر	النطاق التكتوني	الدلالة السيسمو–تكتونية
24 أبريل 2026	جنوب شرق كريت / قرب إيرابيترا	M 5.8	12.8 كم	NEIC/USGS عبر GDACS	جنوب كريت / القطاع الأوسط من القوس الهليني	يؤكد استمرار النشاط الزلزالي الضحل قرب واجهة الاندساس وجنوب كريت
22 مايو 2025	كريت، اليونان	M 6.2	53–64 كم	USGS / EMSC	كريت / القطاع الأوسط للقوس الهليني	زلزال متوسط العمق نسبيًا، يعكس نشاط اللوح الغاطس أو نطاق التشوه المرتبط بالاندساس
20 نوفمبر 2022	كريت، اليونان	M 5.5	63 كم	USGS	كريت / شرق المتوسط	يشير إلى استمرار الزلازل المتوسطة العمق المرتبطة بمنظومة اللوح الإفريقي الغاطس
12 أكتوبر 2021	باليكاستروـ شرق كريت	M 6.4	20 كم	USGS	شرق كريت / القطاع الشرقي من القوس الهليني	يبرز حساسية شرق كريت للتشوه القشري والارتباط الانتقالي بين الاندساس والقص
27 سبتمبر 2021	ترابسانون / وسط كريت	M 6.0	8.7 كم	USGS	كريت / صدوع قشرية داخلية	يعكس نشاط الصدوع الضحلة داخل القشرة الإيجية فوق نطاق الاندساس
2 مايو 2020	جنوب كريت / جنوب إيرابيترا	Mw 6.6	نحو 10 كم	USGS/GFZ/EMSC	القطاع الأوسط من نطاق الاندساس الهليني	حدث بحري ضحل مهم، ارتبط بتسجيل تسونامي صغير محليًا، ويدعم اعتبار جنوب كريت مصدرًا زلزاليًا–تسوناميًا نشطًا
27 نوفمبر 2019	بين كريت وكيثيرا / قرب أنتيكيثيرا	Mw 6.1	نحو 56 كم	كتالوجات زلزالية إقليمية / USGS-ANSS	غرب كريت–كيثيرا	يوضح استمرار النشاط الزلزالي في القطاع الغربي–الأوسط من القوس الهليني
25 أكتوبر 2018	جنوب غرب زاكينثوس / البحر الأيوني	M 6.8	14 كم	USGS	القطاع الغربي للقوس / البحر الأيوني	من أقوى الأحداث الحديثة في القطاع الغربي، ويدل على تشوه نشط مرتبط بالانضغاط والقص
20 يوليو 2017	شرق كوس / جنوب شرق بحر إيجه	M 6.6	7 كم	USGS	القطاع الشرقي للقوس الهليني–الانتقال نحو الأناضول	زلزال ضحل مؤثر يوضح تعقيد التشوه بين الاندساس والقص في القطاع الشرقي

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على كتالوجات USGS وEMSC وGDACS وGFZ/USGS-ANSS، تاريخ الاطلاع: 12 يونيو 2026.

وتدعم هذه المعطيات التاريخية والحديثة فرضية الدراسة التي ترى أن المخاطر الزلزالية والتسونامية على شرق ليبيا لا ينبغي تقييمها من خلال النشاط المحلي وحده، بل ضمن إطار إقليمي أوسع يأخذ في الاعتبار ديناميات القوس الهِلّيني، واستمرار الاندساس، وتراجع اللوح الغاطس، وقابلية شرق المتوسط لإنتاج أحداث زلزالية–تسونامية عابرة للحوض. ومن ثم، فإن فهم السجل الزلزالي والتسونامي في شرق المتوسط يمثل خطوة أساسية في بناء تقييم أكثر واقعية للمخاطر المحتملة على هامش سيرينايكا والساحل الليبي الشرقي.

6. المخاطر السيسموتكتوني ة على شرق ليبيا

تشير المعطيات الجيوديناميكية والسيسموتكتوني ة المعروضة في المحاور السابقة إلى أن الساحل الليبي الشرقي، رغم ابتعاده النسبي عن نطاق الاندساس المباشر، لا يمكن اعتباره هامشًا مستقرًا بالكامل أو معزولًا عن ديناميات شرق المتوسط. فموقع سيرينايكا على الهامش الجنوبي للحوض المتوسطي، في مقابل القطاع الأوسط من قوس الاندساس الهِلّيني جنوب كريت، يضعها ضمن مجال التأثر غير المباشر بالعمليات الإقليمية المرتبطة بتقارب إفريقيا–أوراسيا، وتراجع اللوح الغاطس، وإعادة توزيع الإجهادات عبر مقدمة المتوسط الرسوبية والرف القاري الجنوبي. وتساعد الأشكال (1–4) في توضيح هذا الترابط المكاني والبنيوي بين منظومة الاندساس الهِلّيني وهامش سيرينايكا، من خلال إبراز موقع القوس، وخصائص الاندساس، وحركة الكتلة الإيجية، وهندسة اللوح الإفريقي الغاطس.

وتُظهر خرائط الخطر الزلزالي الإقليمية الحديثة أن شرق ليبيا يقع عمومًا ضمن نطاق خطر زلزالي منخفض إلى متوسط مقارنة بجنوب اليونان وتركيا وبحر إيجه، غير أن هذا التصنيف العام لا يلغي وجود حساسية محلية أعلى في بعض قطاعات سيرينايكا، ولا سيما في المناطق الساحلية والجبلية المرتبطة بالجبل الأخضر والرف القاري الشرقي. وترتبط هذه الحساسية بوجود بنى صدعية موروثة، وتراكيب كربوناتية متشققة، وتدرجات طبوغرافية حادة، فضلًا عن احتمال تأثر بعض هذه البنى بتغيرات حقل الإجهادات الإقليمي المرتبط بديناميات شرق المتوسط (ESHM20, 2020; Le Pichon & Kreemer, 2010).

ولا تتمثل المخاطر السيسموتكتوني ة على شرق ليبيا في النشاط الزلزالي المحلي وحده، بل تشمل أيضًا احتمالية التأثر بالأحداث الزلزالية والتسونامية الإقليمية الكبرى الناتجة عن قوس الاندساس الهِلّيني. ويُعد زلزال كريت سنة 365م، كما يوضحه السجل التاريخي في الجدول (2)، شاهدًا مهمًا على قدرة النظام الهِلّيني على إنتاج موجات تسونامي عابرة للحوض وصلت آثارها إلى السواحل الليبية والمصرية. ومن ثم، فإن تقييم المخاطر على الساحل الليبي الشرقي ينبغي أن يجمع بين مصدرين متكاملين للخطر: مصدر محلي يتمثل في البنى الصدعية الموروثة داخل سيرينايكا، ومصدر إقليمي يتمثل في الزلازل والتسونامي المرتبطة بمنظومة الاندساس الهِلّيني.

وتزداد أهمية هذا الخطر الإقليمي في ضوء الطبيعة شبه المغلقة للحوض المتوسطي، حيث يمكن لمورفولوجية قاع البحر، واتساع الرف القاري، وشكل الخلجان والسواحل، أن تسهم في توجيه موجات التسونامي وتضخيمها محليًا عند وصولها إلى بعض القطاعات الساحلية. وتبرز مدن مثل درنة وسوسة وطبرق بوصفها مواقع ذات حساسية خاصة، نظرًا لقرب العمران والبنية التحتية من الساحل، ووجود خصائص طبوغرافية ومورفولوجية قد تزيد من مستوى التعرض للأمواج العالية أو الاهتزازات الزلزالية الإقليمية. كما أن بعض القطاعات الساحلية المنخفضة أو المحصورة بين البحر والمنحدرات قد تكون أكثر قابلية للتأثر في حال حدوث تسونامي إقليمي كبير.

وتدعم التسجيلات الزلزالية الحديثة، كما يوضح الجدول (3)، فكرة استمرار النشاط السيسموتكتوني في نطاق القوس الهِلّيني وشرق المتوسط، ولا سيما في جنوب كريت، والبحر الأيوني، وبحر إيجه، وقطاع رودس–كوس. ورغم أن هذه الأحداث لا تعني بالضرورة وجود تهديد مباشر ودائم للساحل الليبي، فإنها تؤكد أن النظام التكتوني المسؤول عن بعض الأحداث التاريخية الكبرى ما يزال نشطًا، وأن آليات الاندساس وتراجع اللوح الغاطس وتراكم الإجهادات لم تتوقف. وهذا يجعل إدراج شرق ليبيا ضمن نماذج الخطر الإقليمي أمرًا ضروريًا، خاصة عند دراسة المخاطر الساحلية طويلة الأمد.

ومن منظور هندسي وتخطيطي، تمثل محدودية شبكات الرصد الزلزالي والجيوفيزيائي في شرق ليبيا تحديًا رئيسًا أمام بناء تقييم دقيق للمخاطر. فغياب كثافة كافية من محطات الرصد الزلزالي، وضعف البيانات المتعلقة بالنشاط الصدعي المحلي، ونقص الدراسات البحرية التفصيلية للرف القاري والمنحدر البحري، كلها عوامل تحد من القدرة على فهم السلوك السيسموتكتوني الحقيقي لهامش سيرينايكا. كما أن غياب نماذج محاكاة تفصيلية للتسونامي على الساحل الليبي يجعل تقدير سيناريوهات الغمر ووقت الوصول ومستوى التأثير المحتمل أمرًا غير مكتمل.

وتزداد الهشاشة المستقبلية بفعل التوسع العمراني الساحلي، وتمركز البنية التحتية الحيوية بالقرب من البحر، وضعف إدماج الاعتبارات الجيوديناميكية في سياسات التخطيط العمراني. فالتعامل مع المدن الساحلية في شرق ليبيا بوصفها مناطق منخفضة الخطر بصورة مطلقة قد يؤدي إلى إغفال مصادر خطر إقليمية نادرة الحدوث لكنها عالية التأثير. ولذلك، فإن التخطيط الساحلي في هذه المناطق يحتاج إلى مقاربة احترازية تجمع بين خرائط الخطر الزلزالي، ونماذج التسونامي، وتحليل الهشاشة العمرانية، ودراسة الخصائص الجيولوجية والمورفولوجية المحلية.

وتشير هذه المعطيات إلى أن شرق ليبيا ينبغي أن يُفهم بوصفه هامشًا منخفضًا إلى متوسط الحساسية السيسموتكتوني ة ضمن نظام إقليمي نشط، لا بوصفه نطاقًا مستقرًا بالكامل. ومن ثم، تبرز الحاجة إلى تطوير استراتيجية متكاملة لإدارة المخاطر الجيوديناميكية في الساحل الليبي الشرقي، تشمل تعزيز شبكات الرصد الزلزالي والجيوفيزيائي، وإنشاء قاعدة بيانات حديثة للصدوع والبنى النشطة أو المحتملة، وإعداد خرائط تفصيلية للهشاشة الساحلية، وتطوير نماذج محاكاة للتسونامي، وإدماج الاعتبارات السيسموتكتوني ة ضمن سياسات التخطيط العمراني الساحلي والبنية التحتية الحيوية في مدن سيرينايكا.

وبناءً على ذلك، فإن تقييم المخاطر السيسموتكتوني ة على شرق ليبيا لا ينبغي أن يقتصر على قياس مستوى النشاط الزلزالي المحلي الحالي، بل يجب أن يستند إلى قراءة إقليمية أوسع تأخذ في الاعتبار ديناميات القوس الهِلّيني، وسجل الأحداث التاريخية الكبرى، والنشاط الزلزالي الحديث، وقابلية البنى المحلية لإعادة التنشيط. وهذه المقاربة التكاملية هي الأكثر ملاءمة لفهم طبيعة الخطر الحقيقي، وتوجيه سياسات الحد من الهشاشة المستقبلية على الساحل الليبي الشرقي.

7. المناقشة

تكشف المعطيات الجيوديناميكية والسيسموتكتوني ة التي عرضتها هذه الدراسة أن تفسير الاستقرار البنيوي لشرق ليبيا لا ينبغي أن يتم بمعزل عن النظام التكتوني الأوسع لشرق البحر المتوسط. فهامش سيرينايكا، رغم وقوعه خارج نطاق الاندساس المباشر وخارج أكثر الأحزمة الزلزالية كثافة في جنوب اليونان وبحر إيجه، لا يمثل هامشًا ساكنًا بالكامل، بل يقع ضمن مجال تأثر إقليمي غير مباشر بمنظومة قوس الاندساس الهِلّيني. وتُظهر الأشكال (1–4) أن العلاقة بين القوس الهِلّيني والهامش الليبي الشرقي ليست علاقة مكانية بسيطة، بل علاقة جيوديناميكية مركبة تتداخل فيها حركة الصفائح، وتراجع اللوح الغاطس، وتمدد بحر إيجه، وهندسة اللوح الإفريقي، ومقدمة المتوسط الرسوبية.

وتتمثل القيمة التفسيرية الأساسية لهذه الدراسة في أنها تنقل النظر إلى شرق ليبيا من إطار محلي ضيق، يركز غالبًا على ضعف النشاط الزلزالي المسجل، إلى إطار إقليمي أوسع يربط بين البنية المحلية لسيرينايكا وديناميات شرق المتوسط. فالتصنيف التقليدي لشرق ليبيا بوصفه نطاقًا منخفضًا إلى متوسط النشاط الزلزالي لا يكفي وحده لفهم طبيعة المخاطر المحتملة؛ لأن انخفاض معدل الزلازل المحلية لا يعني بالضرورة غياب التأثير التكتوني الإقليمي. بل قد يعكس ذلك بطء معدلات التحرر الزلزالي، أو نقص كثافة شبكات الرصد، أو ضعف توثيق النشاط الصدعي البحري والمحلي، مقارنة بالمناطق الشمالية من شرق المتوسط.

وتؤكد ديناميات تراجع اللوح الغاطس (Slab Rollback) أن القوس الهِلّيني ليس بنية تكتونية ثابتة، بل نظام متطور باستمرار، يعيد تنظيم الإجهادات داخل شرق المتوسط. فالتراجع النسبي لجبهة الاندساس، وتمدد القشرة الإيجية، وحركة الكتلة الإيجية نحو الجنوب الغربي، كلها عمليات تسهم في تكوين مجال إجهادات مركب لا يقتصر أثره على بحر إيجه والخندق الهِلّيني، بل يمتد بدرجات متفاوتة نحو الهوامش الجنوبية لحوض المتوسط (Le Pichon & Kreemer, 2010). ومن هذا المنظور، يمكن فهم بعض مظاهر الحساسية البنيوية في سيرينايكا بوصفها استجابة محتملة، غير مباشرة وطويلة الأمد، لإعادة توزيع الإجهادات المرتبطة بتقارب إفريقيا–أوراسيا واستمرار تطور منظومة الاندساس الهِلّيني.

وتبرز مقدمة المتوسط الرسوبية (Mediterranean Ridge) بوصفها عنصرًا محوريًا في هذا التفسير. فهي لا تمثل مجرد إسفين رسوبي متراكم أمام جبهة الاندساس، بل تشكل بنية انتقالية نشطة نسبيًا بين واجهة الاندساس العميقة والهامش الجنوبي لشرق المتوسط. ومن ثم، يمكن النظر إليها كوسيط جيوديناميكي يسهم في إعادة توزيع الإجهادات عبر حوض المتوسط، ويمنح الهامش الليبي الشرقي أهمية خاصة ضمن هذا النظام، حتى وإن ظل التأثير فيه أقل وضوحًا وأقل كثافة من النطاقات القريبة من جنوب كريت وبحر إيجه (Mascle & Chaumillon, 1998).

وعلى المستوى المحلي، تُظهر البنية الجيولوجية لسيرينايكا أن المنطقة تمتلك قابلية بنيوية كامنة للتفاعل مع الإجهادات الإقليمية. فوجود هضبة الجبل الأخضر، والرف القاري الشرقي، والمنحدر البحري، والصدوع الموروثة المرتبطة بتاريخ تطور الهامش الشمالي لإفريقيا، كلها عناصر تجعل الإقليم أكثر تعقيدًا من أن يُنظر إليه كهامش مستقر تمامًا. غير أن هذه الدراسة لا تفترض علاقة سببية مباشرة بين القوس الهِلّيني وتكوّن صدوع سيرينايكا، بل تقترح أن هذه البنى الموروثة قد تكون قابلة لإعادة التنشيط الجزئي أو الموضعي ضمن حقل إجهادات إقليمي أوسع، خاصة إذا تزامنت مع تغيرات في مستوى الاقتران التكتوني، أو مع أحداث زلزالية إقليمية كبيرة.

ومن هنا تبرز أهمية التمييز بين الاستقرار النسبي والاستقرار المطلق. فشرق ليبيا قد يكون أقل نشاطًا زلزاليًا من جنوب اليونان وبحر إيجه والأناضول، لكنه ليس معزولًا جيوديناميكيًا عن النظام التكتوني المحيط به. وهذا ينسجم مع التصورات الحديثة التي ترى أن بعض الهوامش القارية الهادئة نسبيًا قد تظل خاضعة لتأثيرات بعيدة المدى ناتجة عن إعادة توزيع الإجهادات داخل الصفائح أو على حدودها (Nocquet, 2012). وبذلك يصبح الفصل الحاد بين "مناطق نشطة ومناطق مستقرة تبسيطًا غير كافٍ في حوض تكتوني معقد مثل شرق المتوسط.

أما من زاوية المخاطر، فتشير نتائج الدراسة إلى أن التهديد الأهم للساحل الليبي الشرقي لا ينبع بالضرورة من الزلازل المحلية وحدها، بل من التفاعل بين مصدرين للخطر: مصدر محلي يتمثل في البنى الصدعية الموروثة والحساسية الجيولوجية لسيرينايكا، ومصدر إقليمي يتمثل في الزلازل والتسونامي المرتبطة بالقوس الهِلّيني. ويُعد زلزال كريت سنة 365م المثال الأكثر دلالة على هذا البعد الإقليمي؛ إذ أظهر قدرة النظام الهِلّيني على توليد حدث زلزالي–تسونامي واسع التأثير امتدت آثاره إلى سواحل برقة ومصر وشرق المتوسط (Stiros, 2010; Polonia et al., 2013). ومن ثم، فإن تقييم المخاطر على شرق ليبيا يجب ألا يعتمد فقط على التاريخ الزلزالي المحلي، بل ينبغي أن يدمج السجل التاريخي للأحداث الكبرى كما في الجدول (2)، مع النشاط الزلزالي الحديث المسجل آليًا كما في الجدول (3).

وتدعم التسجيلات الزلزالية الحديثة هذه الرؤية؛ إذ تُظهر أن جنوب كريت، والبحر الأيوني، وبحر إيجه، وقطاع رودس–كوس ما تزال نطاقات نشطة زلزاليًا، بما يعكس استمرار فاعلية النظام السيسموتكتوني للقوس الهِلّيني. وعلى الرغم من أن هذه الأحداث الحديثة لا تعني بالضرورة وجود تهديد مباشر ودائم للساحل الليبي، فإنها تثبت أن المصدر الإقليمي المسؤول عن بعض الأحداث التاريخية الكبرى لم يفقد نشاطه. وهذا يمنح دراسة المخاطر على الساحل الليبي الشرقي أهمية خاصة، لا سيما عند التعامل مع أحداث نادرة الحدوث لكنها عالية التأثير.

كما أن الخصائص المورفولوجية للساحل الليبي الشرقي قد تزيد من مستوى الحساسية أمام بعض التأثيرات الزلزالية والتسونامية. فالخلجان الضيقة، والمنحدرات الساحلية الحادة، والتدرج المفاجئ بين الجبل والساحل في بعض قطاعات الجبل الأخضر، كلها عوامل قد تسهم في تضخيم التأثيرات المحلية للأمواج العالية أو الاهتزازات الأرضية. وتزداد خطورة هذه العوامل مع التوسع العمراني في مدن مثل درنة، وسوسة، وطبرق، وطلميثة وتمركز أجزاء من البنية التحتية الحيوية بالقرب من الساحل، دون توفر خرائط تفصيلية كافية للهشاشة الساحلية أو سيناريوهات دقيقة لغمر التسونامي.

وتكشف الدراسة كذلك عن فجوة معرفية ومنهجية واضحة في دراسة شرق ليبيا مقارنة بالنطاقات الشمالية لشرق المتوسط. فمعظم النماذج الجيوفيزيائية والزلزالية عالية الدقة تتركز على جنوب اليونان وبحر إيجه وتركيا، بينما لا يزال الهامش الليبي الشرقي يعاني نقصًا في شبكات الرصد الزلزالي، والدراسات البحرية العميقة، وخرائط الصدوع النشطة، وبيانات GPS وInSAR، ونماذج محاكاة التسونامي. ويمثل هذا النقص عائقًا أساسيًا أمام بناء تقييم احتمالي دقيق للمخاطر السيسموتكتونية، خاصة في منطقة يتداخل فيها الضعف النسبي للبيانات المحلية مع احتمالية التأثر بأحداث إقليمية كبرى.

ومن الناحية التخطيطية، تقود هذه النتائج إلى ضرورة إعادة إدماج البعد السيسموتكتوني في سياسات التخطيط الساحلي وإدارة المخاطر في شرق ليبيا. فالاعتماد على التصنيف العام للمنطقة بوصفها منخفضة أو متوسطة الخطر قد يؤدي إلى التقليل من أهمية الأخطار النادرة عالية التأثير، مثل التسونامي الإقليمي أو إعادة تنشيط بعض الصدوع المحلية. لذلك، ينبغي أن تتجه إدارة المخاطر في سيرينايكا شرق ليبيا نحو مقاربة احترازية متعددة المستويات، تجمع بين الرصد الزلزالي، والتحليل الجيوديناميكي، والنمذجة البحرية، وتقييم الهشاشة العمرانية، وتخطيط استخدامات الأرض في المدن الساحلية.

وبناءً على ذلك، تقترح الدراسة أن شرق ليبيا يجب أن يُفهم بوصفه هامشًا منخفضًا إلى متوسط الحساسية السيسموتكتونية ضمن نظام إقليمي نشط، لا بوصفه هامشًا مستقرًا ومعزولًا. وتكمن أهمية هذا التصور في أنه لا يضخم الخطر ولا ينفيه، بل يضعه في إطاره العلمي الصحيح: خطر غير دائم الحدوث، لكنه محتمل وذو أثر كبير إذا ارتبط بزلزال إقليمي قوي أو تسونامي عابر للحوض. ومن ثم، فإن بناء فهم واقعي للمخاطر يتطلب الانتقال من المقاربة المحلية المحدودة إلى مقاربة تكاملية تربط بين ديناميات الاندساس الهِلّيني، وتراجع اللوح الغاطس، ومقدمة المتوسط الرسوبية، والبنية الصدعية الموروثة في سيرينايكا، والنشاط الزلزالي التاريخي والحديث في شرق المتوسط.

وتتمثل الإضافة العلمية الرئيسة لهذه الدراسة في تقديم إطار تفسيري يربط بين العمليات الجيوديناميكية الكبرى في شرق المتوسط وبين الحساسية البنيوية والمخاطر الساحلية في شرق ليبيا. فهذا الربط يسمح بتجاوز النظرة التقليدية التي تفصل بين مصدر الخطر في شمال المتوسط ومنطقة التأثر في جنوبه، ويؤكد أن الحوض المتوسطي يعمل كنظام جيوديناميكي مترابط، تنتقل داخله التأثيرات عبر الصفائح، والبنى الرسوبية، والأحواض البحرية، والرفوف القارية. وبذلك تصبح سيرينايكا حالة مهمة لفهم كيف يمكن لهامش يبدو هادئًا نسبيًا أن يظل جزءًا من منظومة تكتونية أوسع وأكثر نشاطًا.

وفي ضوء ذلك، تؤكد الدراسة الحاجة إلى برنامج بحثي وجيوفيزيائي طويل المدى في شرق ليبيا، يشمل إنشاء محطات GPS عالية الدقة، وتوسيع شبكات الرصد الزلزالي، واستخدام تقنيات InSAR لرصد التشوهات القشرية البطيئة، وتنفيذ مسوحات بحرية للرف القاري والمنحدر الشمالي لسيرينايكا، وتطوير نماذج احتمالية للمخاطر الزلزالية والتسونامية. كما ينبغي إدماج هذه النتائج ضمن سياسات التخطيط العمراني الساحلي، ولا سيما في المدن الأكثر حساسية، بما يضمن تقليل الهشاشة المستقبلية ورفع مستوى الجاهزية أمام الأخطار الجيوديناميكية الإقليمية.

استنتاج تفسيري: فرضية إعادة التنشيط الصدعي والرفع التفاضلي لهامش سيرينايكا

تقود المعطيات التي ناقشتها الدراسة إلى طرح فرضية تفسيرية جديرة بالتقصي، مفادها أن الصدوع المحلية والبنى الخطية الموروثة في الجبل الأخضر وهامش سيرينايكا قد لا تمثل مجرد عناصر بنيوية منعزلة عن السياق الجيوديناميكي الإقليمي، بل ربما تعكس، في جانب من جوانبها، استجابة طويلة الأمد لإعادة تنظيم حقل الإجهادات في شرق المتوسط، ولا سيما ذلك الحقل المرتبط بتقارب الصفيحة الإفريقية مع النطاق الأوراسي–الإيجي، واندساس اللوح الإفريقي أسفل القوس الهِلّيني، وتراجع اللوح الغاطس باتجاه الجنوب. ومن هذا المنظور، لا تُفهم صدوع الجبل الأخضر بوصفها نتاجًا مباشرًا وآنيًا لتراجع اللوح الغاطس، وإنما بوصفها بنى موروثة قابلة لإعادة التنشيط أو التعديل ضمن نظام إجهادات إقليمي متغير، تتداخل فيه قوى الانضغاط الأمامي للقوس، والتمدد الخلفي في بحر إيجه، والقص التحويلي في القطاعات الانتقالية، مع استجابة الهوامش الجنوبية للحوض المتوسطي بدرجات متفاوتة.

وتستمد هذه الفرضية وجاهتها من عدة مؤشرات مترابطة؛ أولها أن الجبل الأخضر يمثل كتلة بنيوية مرتفعة ذات تاريخ تكتوني معقد، تتجلى فيها مظاهر الرفع التفاضلي، والحافات البنيوية، والصدوع، والمصاطب، والتباينات المورفولوجية الحادة بين الهضبة والساحل والمنحدر القاري. وثانيها أن موقع سيرينايكا في مواجهة القطاع الأوسط من منظومة الاندساس الهِلّيني يجعلها جزءًا من المجال الجنوبي للحوض المتوسطي القابل للتأثر غير المباشر بإعادة توزيع الإجهادات الناتجة عن حركة اللوح الغاطس وتراجع الخندق. وثالثها أن الرفع البنيوي للجبل الأخضر لا يمكن فصله كليًا عن تاريخ التقارب الإفريقي–الأوراسي وتطور الهامش الشمالي لإفريقيا، بما يفتح المجال لقراءة هذا الرفع بوصفه استجابة تراكمية وطويلة الأمد لقوى إقليمية، لا مجرد ظاهرة محلية محدودة.

وعليه، يمكن الدفع بأن بعض مظاهر الرفع التفاضلي وإعادة التنشيط الصدعي في الجبل الأخضر قد تكون مرتبطة، بصورة غير مباشرة، بديناميات الاندساس الهِلّيني وتراجع اللوح الإفريقي الغاطس، من حيث إسهام هذه الديناميات في تعديل اتجاهات الإجهادات الإقليمية وإعادة توزيعها داخل شرق المتوسط. غير أن هذه العلاقة ينبغي أن تُطرح بوصفها فرضية تفسيرية قابلة للاختبار، لا نتيجة نهائية محسومة؛ إذ يتطلب التحقق منها توظيف بيانات جيوديسية دقيقة، مثل GPS وInSAR، وتحليلًا مورفوتكتونيًا مفصلًا لشبكة الأودية والحافات والمصاطب، وتأريخًا للمصاطب البحرية والنهرية، فضلًا عن نمذجة عددية لحقل الإجهادات بين القوس الهِلّيني وهامش سيرينايكا. وبذلك تفتح هذه الدراسة أفقًا بحثيًا مهمًا لفهم الجبل الأخضر لا بوصفه كتلة محلية مستقلة فحسب، بل بوصفه جزءًا من هامش قاري جنوبي قد يحتفظ بإشارات جيومورفولوجية وتكتونية لاستجابة أعمق لديناميات شرق المتوسط.

8. الخاتمة

خلصت هذه الدراسة إلى أن قوس الاندساس الهِلّيني لا ينبغي النظر إليه بوصفه نطاقًا تكتونيًا محصورًا في جنوب اليونان وبحر إيجه، بل بوصفه منظومة جيوديناميكية إقليمية واسعة التأثير، تسهم في تشكيل أنماط التشوه والنشاط السيسموتكتوني في شرق البحر المتوسط. فقد أظهرت المعطيات التي تناولتها الدراسة أن تقارب الصفيحتين الإفريقية والأوراسية، واستمرار اندساس اللوح الإفريقي، وآليات تراجع اللوح الغاطس (Slab Rollback)، وإعادة توزيع الإجهادات عبر مقدمة المتوسط

الرسوبية (Mediterranean Ridge)، تشكل مجتمعة إطارًا تكتونيًا معقدًا تمتد آثاره البنيوية والزلزالية إلى الهوامش الجنوبية للحوض المتوسطي، بما في ذلك هامش سيرينايكا والساحل الشمالي الشرقي لليبيا.
وأوضحت الدراسة أن شرق ليبيا لا يقع ضمن نطاق الاندساس المباشر، ولا يُعد من أكثر أقاليم شرق المتوسط نشاطًا زلزاليًا، إلا أن ذلك لا يبرر التعامل معه بوصفه هامشًا مستقرًا أو معزولًا جيوديناميكيًا. فالبنية الجيولوجية لسيرينايكا، بما تتضمنه من صدوع موروثة، وتراكيب كربوناتية، وهضبة مرتفعة، ورف قاري متصل بمنظومة شرق المتوسط، تمنح الإقليم قابلية نسبية للتأثر بتغيرات حقل الإجهادات الإقليمي. ومن ثم، فإن الاستقرار السيسموتكتوني لشرق ليبيا ينبغي أن يُفهم بوصفه استقرارًا نسبيًا داخل نظام تكتوني إقليمي نشط، لا استقرارًا مطلقًا منفصلًا عن ديناميات الاندساس الهِلّيني.
كما بيّنت الدراسة أن المخاطر المحتملة على الساحل الليبي الشرقي لا ترتبط فقط بإمكانية إعادة تنشيط بعض البنى الصدعية المحلية داخل الجبل الأخضر والرف القاري الشرقي، بل تشمل أيضًا قابلية التأثر بالأحداث الزلزالية–التسونامية الإقليمية الكبرى المرتبطة بالقوس الهِلّيني. ويُعد زلزال كريت سنة 365م نموذجًا تاريخيًا دالًا على قدرة هذا النظام على إنتاج تسونامي عابر للحوض وصل تأثيره إلى السواحل الليبية والمصرية، وهو ما يؤكد ضرورة إدراج الساحل الليبي الشرقي ضمن تقييمات المخاطر الإقليمية في شرق المتوسط، حتى وإن كان النشاط الزلزالي المحلي محدودًا نسبيًا.
وتؤكد النتائج أن الخصائص المورفولوجية والعمرانية لبعض قطاعات الساحل الليبي الشرقي، ولا سيما في درنة وسوسة وطبرق، قد تزيد من مستوى الهشاشة أمام المخاطر الزلزالية والتسونامية. فالقرب من الساحل، ووجود الخلجان والمنحدرات الساحلية، وتمركز البنية التحتية الحيوية في نطاقات منخفضة أو قريبة من البحر، كلها عوامل تجعل تأثير الأحداث النادرة عالية الشدة أكثر خطورة إذا لم تُدمج الاعتبارات السيسموتكتوني ة ضمن سياسات التخطيط العمراني وإدارة المخاطر.
وتوصي الدراسة بضرورة تعزيز شبكات الرصد الزلزالي والجيوفيزيائي في شرق ليبيا، وتطوير قاعدة بيانات وطنية محدثة للصدوع والبنى البنيوية المحتملة، وتنفيذ دراسات بحرية تفصيلية للرف القاري والمنحدر الشمالي لسيرينايكا، إلى جانب إعداد نماذج احتمالية للمخاطر الزلزالية ومحاكاة سيناريوهات التسونامي على الساحل الليبي الشرقي. كما تؤكد الدراسة أهمية توظيف تقنيات الرصد الحديثة، مثل محطات GPS عالية الدقة وتحليل InSAR، لرصد التشوهات القشرية البطيئة وفهم العلاقة بين البنية المحلية وحقل الإجهادات الإقليمي.
وبناءً على ذلك، فإن أي تقييم مستقبلي للمخاطر الجيوديناميكية في شرق ليبيا يجب أن يتجاوز المقاربة المحلية المحدودة، وأن يعتمد على منظور إقليمي تكاملي يربط بين ديناميات قوس الاندساس الهِلّيني، وتراجع اللوح الغاطس، وانتقال الإجهادات عبر مقدمة المتوسط الرسوبية، والبنية السيسموتكتوني ة لهامش سيرينايكا. وتكمن أهمية هذا المنظور في أنه لا يضخم مستوى الخطر ولا ينفيه، بل يضعه في إطاره العلمي الصحيح: خطر منخفض إلى متوسط من حيث التكرار المحلي، لكنه قابل لأن يصبح عالي التأثير عند ارتباطه بأحداث زلزالية أو تسونامية إقليمية كبرى. ومن ثم، فإن دمج هذا الفهم ضمن التخطيط الساحلي وإدارة المخاطر الطبيعية يمثل خطوة ضرورية لتقليل الهشاشة المستقبلية وتعزيز جاهزية السواحل الليبية الشمالية الشرقية أمام الأخطار الجيوديناميكية في شرق المتوسط.

9. التوصيات والمقترحات

في ضوء ما توصلت إليه الدراسة من نتائج تؤكد أن شرق ليبيا يمثل هامشًا منخفضًا إلى متوسط الحساسية السيسموتكتوني ة ضمن نظام جيوديناميكي إقليمي نشط، وأن تقييم مخاطره لا ينبغي أن يقتصر على النشاط الزلزالي المحلي وحده، يمكن صياغة التوصيات والمقترحات الآتية:

أولًا: التوصيات

1. **إدراج شرق ليبيا ضمن نماذج تقييم المخاطر الجيوديناميكية الإقليمية في شرق المتوسط،** وعدم التعامل مع هامش سيرينايكا والساحل الليبي الشرقي بوصفهما نطاقًا مستقرًا أو معزولًا عن تأثيرات قوس الاندساس الهِلّيني، خاصة في ضوء موقعهما المقابل للقطاع الأوسط من القوس الهليني جنوب كريت.
2. **تعزيز شبكات الرصد الزلزالي والجيوفيزيائي في شرق ليبيا،** من خلال إنشاء محطات رصد حديثة في نطاق الجبل الأخضر والساحل الشمالي الشرقي والرف القاري المجاور، وربطها بكتالوجات الرصد الإقليمية والدولية، بما يسمح بفهم أدق للنشاط الزلزالي المحلي والإقليمي.
3. **إعداد قاعدة بيانات وطنية للصدوع والبنى التكتونية في سيرينايكا،** تشمل الصدوع المعروفة والمحتملة، واتجاهاتها، وامتداداتها، وعلاقتها بالتجمعات العمرانية والبنية التحتية، مع تحديثها اعتمادًا على الخرائط الجيولوجية والاستشعار عن بعد والدراسات الميدانية.
4. **تطوير نماذج احتمالية للمخاطر الزلزالية والتسونامية على الساحل الليبي الشرقي،** بحيث تراعي الأحداث المحلية والإقليمية معًا، ولا سيما السيناريوهات المرتبطة بزلازل جنوب كريت والقوس الهِلّيني، مع تقدير مناطق الغمر المحتملة وزمن وصول موجات التسونامي.
5. **إدماج الاعتبارات السيسموتكتوني ة والتسونامية ضمن سياسات التخطيط العمراني الساحلي،** خاصة في مدن درنة وسوسة وطبرق والمناطق الساحلية الواقعة على امتداد الجبل الأخضر، وذلك عند تحديد مناطق التوسع العمراني ومواقع البنية التحتية الحيوية.

6. **إعداد خرائط تفصيلية للهشاشة الساحلية في شرق ليبيا** تجمع بين الخصائص الجيولوجية والمورفولوجية، والقرب من الساحل، والانحدار، والكثافة العمرانية، ومواقع المنشآت الحيوية، بما يساعد على تحديد المناطق الأكثر تعرضًا للمخاطر النادرة عالية التأثير.
7. **تعزيز التعاون المؤسسي والعلمي في مجال إدارة المخاطر الجيوديناميكية** بين الجامعات الليبية، ومراكز الرصد الزلزالي، والهيئات الجيولوجية، والبلديات الساحلية، وأجهزة الطوارئ، بما يسهم في بناء منظومة وطنية أكثر جاهزية للتعامل مع الزلازل والتسونامي والمخاطر الساحلية.

ثانيًا: المقترحات البحثية المستقبلية

1. **إجراء دراسة جيوديناميكية تفصيلية لهامش سيرينايكا والرف القاري الشرقي**، تعتمد على دمج بياناتGPS ، ونماذجSlab2 ، وبيانات الأعماق البحرية، وكتالوجات الزلازل، بهدف بناء نموذج إقليمي يفسر انتقال الإجهادات من منظومة القوس الهِلّيني نحو شرق ليبيا.
2. **تنفيذ دراسة مستقلة حول مخاطر التسونامي على الساحل الليبي الشرقي**، تقوم على سيناريوهات متعددة تشمل زلازل جنوب كريت، والقطاع الشرقي من القوس الهِلّيني، وخندق قبرص، مع إنتاج خرائط غمر تفصيلية للمدن الساحلية الحساسة.
3. **استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد وتحليل InSAR لرصد التشوهات القشرية البطيئة** في الجبل الأخضر والساحل الشمالي الشرقي، بما يسمح بالكشف عن أي مؤشرات مكانية محتملة لإعادة تنشيط البنى الصدعية الموروثة.
4. **إعداد أطلس جيوديناميكي أولي لشرق ليبيا** يضم خرائط الزلازل التاريخية والحديثة، والصدوع الموروثة، ومناطق الهشاشة الساحلية، ومسارات التأثر التسونامي المحتملة، ليكون أداة علمية مساعدة للباحثين وصناع القرار ومؤسسات التخطيط.
5. **توسيع البحث مستقبلًا إلى مقارنة الساحل الليبي الشرقي بسواحل شرق المتوسط الأخرى**، مثل كريت والإسكندرية وقبرص وجنوب تركيا، من حيث التعرض للأحداث الزلزالية–التسونامية، والهشاشة الساحلية، ومستوى الجاهزية المؤسسية.
6. **عقد مؤتمر علمي إقليمي حول المخاطر الزلزالية والتسونامية في شرق المتوسط**، بمشاركة مؤسسات البحث والرصد والتخطيط في دول نطاق القوس الهِلّيني وشرق المتوسط، مثل اليونان، وتركيا، وقبرص، ومصر، وليبيا، بهدف تبادل البيانات والخبرات، وبناء نماذج إقليمية مشتركة للمخاطر، وتعزيز التعاون في مجالات الرصد الزلزالي، والإنذار المبكر، والتخطيط الساحلي، وإدارة الكوارث

10. References

1. Ambraseys, N. N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A multidisciplinary study of seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.
2. Danciu, L., Nandan, S., Reyes, C., Basili, R., Weatherill, G., Beauval, C., Rovida, A., Vilanova, S., Sesetyan, K., Bard, P.-Y., Cotton, F., Wiemer, S., & Giardini, D. (2021). *The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model overview*. EFEHR Technical Report 001. https://doi.org/10.12686/a15
3. El-Hawat, A. S., & Shelmani, M. A. (1993). *Short notes and guidebook on the geology of Al Jabal al Akhdar, Cyrenaica, NE Libya*. Earth Science Society of Libya.
4. EMODnet Bathymetry Consortium. (n.d.). *EMODnet Bathymetry data portal*. European Marine Observation and Data Network. Accessed June 12, 2026.
5. European-Mediterranean Seismological Centre. (2024). *EMSC earthquake catalogue and event information*. European-Mediterranean Seismological Centre. Accessed June 12, 2026.
6. GEBCO Bathymetric Compilation Group. (2024). *The GEBCO_2024 Grid: A continuous terrain model of the global oceans and land*. British Oceanographic Data Centre, National Oceanography Centre. https://doi.org/10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f
7. Global Disaster Alert and Coordination System. (2026). *GDACS earthquake event reports*. Accessed June 12, 2026.
8. GreDaSS Working Group. (n.d.). *Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS)*. Accessed June 12, 2026.
9. Guiraud, R., & Bosworth, W. (1997). Senonian basin inversion and rejuvenation of rifting in Africa and Arabia: Synthesis and implications to plate-scale tectonics. *Tectonophysics, 282*(1–4), 39–82. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00212-6

10. Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science, 362*(6410), 58–61. https://doi.org/10.1126/science.aat4723
11. Jolivet, L., & Faccenna, C. (2000). Mediterranean extension and the Africa–Eurasia collision. *Tectonics, 19*(6), 1095–1106. https://doi.org/10.1029/2000TC900018
12. Kiratzi, A., & Louvari, E. (2003). Focal mechanisms of shallow earthquakes in the Aegean Sea and the surrounding lands determined by waveform modelling: A new database. *Journal of Geodynamics, 36*(1–2), 251–274. https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00050-4
13. Kopf, A., Mascle, J., & Klaeschen, D. (2003). The Mediterranean Ridge: A mass balance across the fastest growing accretionary complex on Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108*(B8), 2372. https://doi.org/10.1029/2001JB000473
14. Le Pichon, X., & Angelier, J. (1979). The Hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean area. *Tectonophysics, 60*(1–2), 1–42. https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90131-8
15. Le Pichon, X., & Kreemer, C. (2010). The Miocene-to-present kinematic evolution of the Eastern Mediterranean and Middle East and its implications for dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 38*, 323–351. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152419
16. Mascle, J., & Chaumillon, E. (1998). An overview of Mediterranean Ridge collisional accretionary complex as deduced from multichannel seismic data. *Geo-Marine Letters, 18*, 81–89. https://doi.org/10.1007/s003670050058
17. McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M. N., & Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105*(B3), 5695–5719. https://doi.org/10.1029/1999JB900351
18. McKenzie, D. (1978). Active tectonics of the Alpine–Himalayan belt: The Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 55*(1), 217–254. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x
19. Nocquet, J.-M. (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics, 579*, 220–242. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.03.037
20. Papadopoulos, G. A. (2009). Tsunamis in the Mediterranean Sea. In J. C. Woodward (Ed.), *The physical geography of the Mediterranean* (pp. 493–512). Oxford University Press.
21. Papazachos, B. C., & Comninakis, P. E. (1971). Geophysical and tectonic features of the Aegean Arc. *Journal of Geophysical Research, 76*(35), 8517–8533. https://doi.org/10.1029/JB076i035p08517
22. Piper, D. J. W., & Perissoratis, C. (2003). Quaternary neotectonics and submarine mass movements in the Aegean and Eastern Mediterranean region. *Marine Geology, 196*(1–2), 1–13. https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00040-7
23. Polonia, A., Bonatti, E., Camerlenghi, A., Lucchi, R. G., Panieri, G., & Gasperini, L. (2013). Mediterranean megaturbidite triggered by the AD 365 Crete earthquake and tsunami. *Scientific Reports, 3*, 1285. https://doi.org/10.1038/srep01285
24. Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A.,
25. Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111*, B05411. https://doi.org/10.1029/2005JB004051
26. Royden, L. H., & Papanikolaou, D. J. (2011). Slab segmentation and late Cenozoic disruption of the Hellenic arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 12*(3), Q03010. https://doi.org/10.1029/2010GC003280

27. Alriheebi, R. A. (2026). Integrated Modeling and Mult objective Control of Multilevel DC/AC Inverters for Conducted Electromagnetic Interference Mitigation. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 897-925.
28. Stiros, S. C. (2010). The 8.5+ magnitude, AD 365 earthquake in Crete: Coastal uplift, topography changes, archaeological and historical signature. *Quaternary International, 216*(1–2), 54–63. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.05.005
29. Styron, R., & Pagani, M. (2020). The GEM Global Active Faults Database. *Earthquake Spectra, 36*(1_suppl), 160–180. https://doi.org/10.1177/8755293020944182
30. U.S. Geological Survey. (2024). *USGS earthquake catalogue and event pages*. United States Geological Survey. Accessed June 12, 2026.
31. Vernant, P., Reilinger, R., & McClusky, S. (2014). Geodetic evidence for low coupling on the Hellenic subduction plate interface. *Earth and Planetary Science Letters, 385*, 122–129. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.018

ملاحظة منهجية للمراجع الإلكترونية:

تاريخ الاطلاع على قواعد البيانات الزلزالية والخرائط الرقمية: 12 يونيو 2026.