

Modeling and Simulation of Measuring the Depth of the Sea Water using Laser

Ragheb Ramadan*

Dr. Bassam Gazolen**

Dr. Sameer Ghalia***

(Received 11 / 6 / 2026. Accepted 6 / 8 / 2026)

□ ABSTRACT □

Airborne LiDAR bathymetry (ALB) has emerged as a pivotal technology for the simultaneous acquisition of high-resolution morphological data spanning both coastal topography and benthic environments. Unlike conventional topographic LiDAR operating at the infrared spectrum (1064nm), bathymetric systems integrate a green laser wavelength (532nm) capable of penetrating the water column to resolve shallow benthic features. Driven by stringent environmental regulations and the escalating impacts of climate change—such as sea-level rise and severe fluvial flooding—the demand for precise shallow-water mapping has intensified globally. Efficient coastal zone management, marine hydrological research, and civil engineering infrastructure fundamentally rely on robust, high-fidelity bathymetric data. To address these critical needs, this research develops and simulates an advanced laser-matter interaction framework. This simulation is specifically designed to improve the accuracy of depth mapping and analysis across various shallow water bodies for geological and environmental analysis purposes. Wave and eddy conditions are taken into account, and an appropriate compensation function is derived to achieve optimal seabed mapping accuracy.

Keywords: Airborne LiDAR bathymetry, Green laser propagation, Coastal zone management, Subsurface morphology, Fluvial processes, Numerical simulation

Copyright  :Latakia University Journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Master's Student, Department of Sea Physics, High Institute of Sea Research, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. ragheb.ramadan@latakia-univ.edu.sy

** Professor, Department of Laser, Faculty of Science, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. bassam.ghazolin@latakia-univ.edu.sy

*** Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. smirmotieghaliye@latakia-univ.edu.sy

نمذجة ومحاكاة نظام لتحسين أداء تحديد العمق باستخدام الليزر

راغب رمضان *

د. بسام غزولين **

د. سمير غالية ***

(تاريخ 11 / 6 / 2026. قبل للنشر في 6 / 8 / 2026)

□ ملخص □

برزت تقنية قياس الأعماق بالليزر المحمول جواً (ALB) كتقنية محورية لجمع بيانات مورفولوجية عالية الدقة وبشكل متزامن، تغطي كلاً من تضاريس المناطق الساحلية والبيئات القاعية. وخلافاً لأنظمة الليدار الطبوغرافية التقليدية التي تعمل في طيف الأشعة تحت الحمراء 1064nm، تدمج أنظمة قياس الأعماق طولاً موجياً لليزر الأخضر 532nm يمتلك القدرة على اختراق العمود المائي لتحديد معالم القاع الضحلة. ومدفوعاً باللوائح البيئية الصارمة والآثار المتصاعدة لتغير المناخ —مثل ارتفاع منسوب مياه البحر والفيضانات النهرية الحادة— فقد تكثف الطلب عالمياً على خرائط دقيقة للمياه الضحلة. وتعتمد الإدارة الفعالة للمناطق الساحلية، والبحوث الهيدرولوجية البحرية، وتطبيقات الهندسة المدنية بشكل أساسي على بيانات موثوقة وعالية الدقة لقياس الأعماق. وتلبيةً لهذه الاحتياجات الحرجة، يعمل هذا البحث على تطوير ومحاكاة إطار عمل متقدم للتفاعل بين الليزر والمادة. صممت هذه المحاكاة خصيصاً لتحسين دقة استعادة وتحليل الأعماق عبر مختلف المسطحات المائية الضحلة لأغراض التحليلات الجيولوجية والبيئية، كما تم أخذ حالات الأمواج والدوامات البحرية بعين الاعتبار واستنباط تابع التعويض المناسب لرسم القاع بالدقة المثالية.

الكلمات المفتاحية: قياس الأعماق بالليدار المحمول جواً، انتشار الليزر الأخضر، إدارة المناطق الساحلية، المورفولوجيا تحت السطحية، العمليات النهرية، المحاكاة العددية.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سوريا، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر

بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالب ماجستير، قسم الفيزياء البحرية، المعهد العالي للبحوث البحرية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

ragheb.ramadan@latakia-univ.edu.sy

** أستاذ، قسم الليزر، كلية العلوم، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية. bassam.ghazolin@latakia-univ.edu.sy

*** أستاذ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية. smirmotieghaliye@latakia-univ.edu.sy

مقدمة:

تتامي الاهتمام مؤخراً برسم خرائط المسطحات المائية الداخلية الضحلة [1,2] والمناطق الساحلية البحرية [3]، مدفوعاً بالتشريعات القانونية [4] التي تُلزم الدول بتوثيق موارد المياه العذبة وحمايتها. وتكتسب هذه الالتزامات أهمية قصوى عقب حدوث الفيضانات، أو عند رصد تغيرات بشرية المنشأ في أنظمة التدفق. إن التوصيف الشامل والدقيق لمورفولوجيا مجاري الأنهار [5] يُعد ركيزة أساسية لمهام متعددة في مجالات الهيدرولوجيا، والمورفولوجيا المائية، والأحياء المائية، والهيدروليكا؛ لا سيما في محاكاة الفيضانات، ونمذجة نقل الرواسب، ورسم خرائط الموانئ البيئية [6].

وفي السياق ذاته، تفرض التغيرات المناخية والارتفاع المستمر في مناسيب مياه البحار نتيجة الاحتباس الحراري تحدياتٍ تستدعي مراقبة وإدارة حثيثة للمناطق الساحلية [7]. وبناءً على ذلك، تبرز البيانات الطبوغرافية للأعماق كمتطلب أساسي لكافة أنشطة التخطيط المكاني والساحلي، والبحوث الهيدرولوجية البحرية، وتطبيقات الهندسة الساحلية [8,9,10].

تتعدد التقنيات المباشرة وعن بُعد المستخدمة في نمذجة قاع الخزانات المائية واليابسة المحيطة بها [11]. وتشمل هذه الوسائل أجهزة القياس المباشرة (كالمجسات اليدوية، والعصوية، وأعمدة القياس)، والأنظمة الصوتية المائية المعتمدة على القوارب (مثل أجهزة قياس الصدى أحادية ومتعددة الحزم، وأنظمة القياس التداخلي للأعماق)، وصولاً إلى أنظمة الليزر المحمولة جواً والأقمار الصناعية.

1. مشكلة البحث (Problem Statement)

على الرغم من الكفاءة العالية التي أظهرتها تقنيات الليدار (LiDAR) الطبوغرافية في مسح اليابسة، إلا أن تطبيقها في بيئات المسطحات المائية الضحلة والمناطق الساحلية يواجه عوائق فيزيائية وتشغيلية معقدة. تكمن المشكلة الأساسية في عجز الأطوال الموجية التقليدية (كالأشعة تحت الحمراء) عن اختراق السطح المائي، في حين تواجه الأنظمة المعتمدة على الليزر الأخضر تحديات حثيثة تتعلق بالوهن الإشعاعي (Signal Attenuation) الناتج عن عمليات الامتصاص والتشتت الفيزيائي داخل العمود المائي. تزداد هذه المشكلة تعقيداً في القنوات النهرية والمسطحات الضحلة نتيجة التغيرات الديناميكية المستمرة، مثل ارتفاع مستويات العكارة (Turbidity)، ووجود المواد العضوية العالقة، وتفاوت طبيعة انعكاسية القاع (Benthic Albedo). هذه العوامل تؤدي إلى تشويه النبضة الليزرية المرتدة، مما يتسبب في إضعاف دقة البيانات المستعادة (Depth Retrieval Accuracy) أو الفشل التام في رصد الطبوغرافية الدقيقة للقاع. علاوة على ذلك، يفتقر المكتب الأكاديمي إلى نماذج محاكاة مرنة وشاملة قادرة على التنبؤ الدقيق بسلوك التفاعل بين الليزر والمادة (Laser-Matter Interaction) تحت ظروف بيئية مائية متباينة. وبناءً على ذلك، تبرز حاجة ماسة لتطوير ومحاكاة نظام ليدار متقدم عالي الأداء، يمتلك القدرة على معالجة الإشارات المرتدة وتجاوز عقبات التشتت المائي، لضمان نمذجة وتصوير ثلاثي الأبعاد لبيئات القاع بأعلى دقة ممكنة لغايات التحليل الجيولوجي والبيئي.

أهمية البحث وأهدافه:

2. أهداف البحث (Objectives)

يسعى هذا البحث إلى تحقيق الأهداف التالية:

- بناء نموذج محاكاة ديناميكي للتفاعل بين الليزر والمادة: تصميم وإعداد نموذج رياضي وحاسوبي متكامل يماثل سلوك انتشار نبضات الليزر الأخضر واختراقها للعمود المائي، مع الأخذ بالاعتبار التأثيرات الفيزيائية كالامتصاص والتشتت.
- تحليل تأثير العوامل البيئية والمائية على دقة الإشارة: دراسة وتقييم مدى تأثير المتغيرات البيئية المختلفة—مثل مستويات عكارة المياه (Turbidity)، وتفاوت الأعماق، والخصائص الانعكاسية لمواد القاع—على تشوه النبضة الليزرية المرتدة.
- تطوير خوارزميات معالجة الإشارات لاستعادة الأعماق: ابتكار أو تحسين خوارزميات قادرة على تصفية الضوضاء وفصل الإشارات المرتدة من سطح الماء عن تلك المرتدة من القاع، مما يضمن حساب عمق المسطحات المائية الضحلة بدقة موثوقة.
- نمذجة وتصوير التضاريس تحت السطحية ثلاثية الأبعاد: توليد نماذج رقمية عالية الدقة لتوثيق مورفولوجيا القاع وشكل مجاري الأنهار والمناطق الساحلية، وتقديمها في قالب بصري يخدم التحليلات الجيولوجية والبيئية.
- تقييم كفاءة النظام ومقارنته بالتقنيات التقليدية: التحقق من مدى فاعلية نظام المحاكاة المطور ومقارنة أدائه مع وسائل قياس الأعماق الصوتية والطبوغرافية القياسية، لإثبات جدواه وميزاته التنافسية في خرائط المياه الضحلة.

3. أهمية البحث:

تتبنى أهمية هذا البحث من مواكبته للحاجة الملحة والطلب المتزايد على تقنيات رصد دقيقة تدعم استدامة الموارد المائية وتدير الأزمات البيئية؛ وتتجلى هذه الأهمية في شقين رئيسيين:

أولاً: الأهمية العلمية والنظرية:

- إثراء النمذجة الفيزيائية الضوئية: يساهم البحث في تقديم فهم أعمق وتوصيف أدق لسلوك انتشار الضوء واختراقه للبيئات المائية المعقدة، من خلال نمذجة التفاعل الفيزيائي بين الليزر والمادة تحت ظروف تشغيلية متباينة.
- سد الفجوة المعرفية في خرائط المياه الضحلة: يوفر البحث إطاراً حاسوبياً يقلل من الفجوة الحالية في دقة قياس أعماق البيئات النهرية والساحلية الضحلة، والتي طالما شكلت تحدياً لأنظمة الاستشعار عن بُعد التقليدية بسبب عوامل العكارة والتشتت.

ثانياً: الأهمية التطبيقية والعملية:

- دعم إدارة الكوارث والفيضانات: تتيح النمذجة الدقيقة لقاع الأنهار والمجاري المائية التنبؤ الدقيق بمسارات الفيضانات ومحاكاتها، مما يمنح متخذي القرار بيانات موثوقة لوضع خطط طوارئ استباقية لحماية الأرواح والبنى التحتية.
- تعزيز المراقبة البيئية والجيولوجية: يساهم النظام المطور في رصد عمليات التآكل والترسيب (Erosion and Sedimentation) وتغيرات المورفولوجيا تحت السطحية، مما يدعم جهود حماية الموانئ المائية وتتبع تأثيرات التغير المناخي والأنشطة البشرية.
- تقديم بدائل اقتصادية وعالية الكفاءة: يوفر الاعتماد على محاكاة أنظمة الليدار المحمولة جواً بديلاً هيدرغرافياً يتفوق في السرعة والتغطية المكانية الشاملة مقارنةً بالمسوح الصوتية التقليدية القائمة على القوارب، والتي تفتقر للمرونة في المياه شديدة الضحالة.

4. الدراسات السابقة في مجال تحليل الظواهر الفيزيائية:

تشكل المحيطات ركيزة أساسية في استقرار النظام البيئي العالمي وتنظيم العمليات الجيوفيزيائية والجيوكيميائية كدورتي الكربون والنتروجين [12]، مما يجعل رصدها المستمر مطلباً أساسياً للتنبؤ بالتغيرات المناخية والبيئية البحرية [15]–[13] وضمن هذا الإطار، حظيت تقنيات الاستشعار عن بُعد عبر الأقمار الصناعية باهتمام واسع لقدرتها على توفير مسح مكاني وزمني شامل [16]، [17]. وعلى مدى العقود الماضية، اعتمدت الدراسات الهيدروغرافية على استشعار لون المحيط السلبي (Passive Ocean Color Sensing) لاستخلاص المعاملات الحيوية والبصرية للمياه، مثل تركيزات الكلوروفيل والجسيمات العالقة، اعتماداً على قياس الإشعاع الصاعد من سطح الماء [18]، [19]. بيد أن هذه الأنظمة السلبية تواجه محدودات جوهريّة؛ إذ تقتصر إلى القدرة على سبر الأغوار الرأسية، فضلاً عن ارتهاؤها التام بالإضاءة الشمسية، مما يعطل كفاءتها في الأوقات الليلية أو عند انخفاض زوايا سقوط أشعة الشمس [20]، [21].

لتجاوز هذه العقبات وتحقيق رصد ثلاثي الأبعاد للمكونات المائية، اتجه البحث العلمي نحو تقنيات الاستشعار الليداري النشط Active LiDAR. حيث تتيح هذه التقنية سبر خصائص العمود المائي على مدار الساعة عبر رصد وتحليل الإشارات المرتدة الناتجة عن تفاعل نبضات الليزر مع جزيئات الماء والجسيمات العالقة في الطبقات العليا [22]، [23]. ومع الطفرة التقنية في مجالات البصريات، توسعت تطبيقات الليدار البحري لتشمل قياس الخصائص الضوئية للمياه [24]–[26]، وتقدير درجات الحرارة والملوحة [27]–[34]، وتتبع بقع التلوث النفطي [35]–[38]. كما امتدت لتشمل رصد الموجات الداخلية [39]، [40]، وتحديد مواضع الأسراب السمكية والأهداف المغمورة [41]–[44]، بالإضافة إلى رسم الطبوغرافية المغمورة وتحت السطحية [45]–[47]. ولتوسيع نطاق التغطية، جرى تطوير أنظمة ليدار محمولة على السفن [48]، وجوية [49]، وفضائية [50]، [51]. ومؤخراً، ولتلافي التداخل الإشعاعي الشديد عند الحد الفاصل بين الهواء والماء، طُرحت أنظمة الليدار أحادية الفوتون المغمورة (Underwater Single-Photon LiDAR) كخيار واعد لمراقبة الأعماق [52]، [53].

4.1 الخصائص الفيزيائية لأشعة الليزر:

يُشكل الليزر (LASER) أو تضخيم الضوء بالانبعاث المحفز للإشعاع—الركيزة الأساسية لأنظمة الاستشعار النشطة، نظراً لخصائصه الموجية الفريدة. يتميز هذا الإشعاع الكهرومغناطيسي بكون فوتوناته أحادية الطول الموجي (Monochromatic)، ومتطابقة الطور الفيزيائي (Coherent)، مما يتيح حدوث تداخل بناء (Constructive Interference) يحول الموجات إلى نبضات ضوئية ذات طاقة مكثفة وتماسك شديد زمنياً ومكانياً. وبفضل زاوية الانفراج الضئيلة جداً (Narrow Divergence Angle) التي يتعذر تحقيقها بالوسائل الضوئية التقليدية، غدا الليزر أداة مثالية في تطبيقات القياس والمسح لمسافات متباينة بدقة متناهية، فضلاً عن استخداماته الصناعية والطبية المتعددة.

4.2 ميكانيكية عمل أنظمة الليدار المائية (ALB):

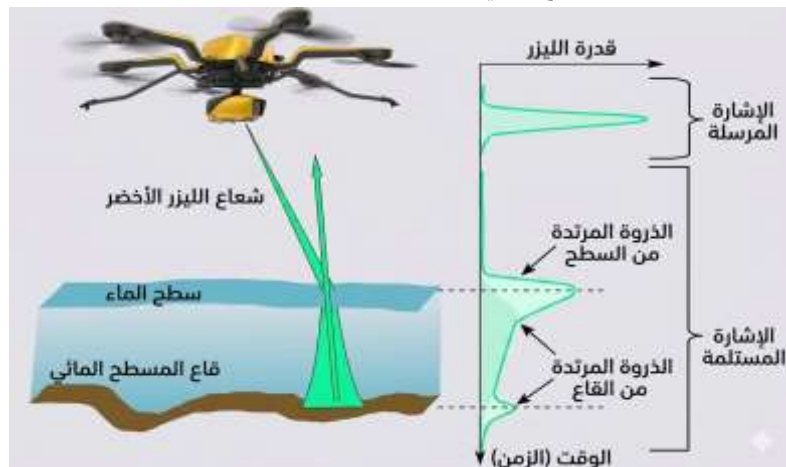
تعتمد أنظمة قياس الأعماق بالليزر المحمول جواً (ALB) بصفة أساسية على الليزر الخضر المستقر عند طول موجي يبلغ 532nm، وذلك للاستفادة من النافذة البصرية المائية التي تسمح لهذا الطيف تحديداً باختراق العمود المائي والوصول إلى القاع في البيئات الضحلة. تبدأ الدورة التشغيلية للنظام بقيام ماسح الليدار المثبت على منصة جوية (كطائرة أو طائرة مسيرة) بإطلاق نبضات ليزرية مكثفة وقصيرة الزمن بمعدلات تكرار مرتفعة تتراوح بين

5000 إلى 500000 نبضة في الثانية. عند ملامسة الشعاع لسطح الماء، ينعكس جزء منه مشكلاً الإشارة المرتدة الأولى، بينما ينكسر الجزء الأكبر ماراً بالوسط المائي. وخلال رحلة الانتشار نحو القاع، يخضع الضوء لعمليات توهين فيزيائية معقدة تشمل الامتصاص والتشتت بفعل جزيئات الماء والمواد العالقة. وفي حال توفر الشفافية الكافية والطاقة الليدارية المناسبة، يصطدم الضوء النافذ بالقاع المائي لينعكس عائداً نحو وحدة الاستشعار الجوية. وتتأثر شدة الإشارة المرتدة من القاع بطبيعة المكونات الجيولوجية له؛ حيث تسجل الرمال البيضاء انعكاسية (Albedo) عالية مقارنة بالترسبات الطينية الداكنة التي تمتص معظم الطاقة الضوئية. يقوم المستقبل الضوئي برصد الفوتونات المرتدة وتحويلها عبر صمامات تضخيم ضوئي أو كواشف متطورة إلى إشارات رقمية، مما ينتج عنه شكل موجي مفصل (Waveform) لكل نبضة مسجلة. ومن خلال هذا المنحنى الإشعاعي، يتم تحديد اللحظة الزمنية الدقيقة لارتداد النبضة من سطح الماء ومن القاع؛ وبمعرفة الفارق الزمني وسرعة الضوء داخل الوسط المائي، يجري حساب العمق الدقيق للمسطح المائي.

4.3. النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية عبر بيئة MATLAB

لإعادة بناء وتوقع سلوك انتشار الليزر بدقة ضمن البيانات المائية، يتطلب البحث الاعتماد على أساليب النمذجة العددية عبر بيئة MATLAB. وتتعدد الخيارات البرمجية وفقاً لمستوى التفاصيل المطلوبة والقدرة الحسابية المتاحة؛ حيث يمكن تطبيق طرق عددية متقدمة لحل معادلات ماكسويل مثل طريقة مجال الفرق الزمني المحدود (FDTD) أو طريقة العناصر المحدودة (FEM) عند رصد التفاعلات النانوية والدقيقة.

أما في سياق النمذجة الهيدروغرافية واسعة النطاق ولتحقيق توازن بين الدقة والجهد الحسابي، يتم تبني نهج رياضي يعتمد على نمذجة الشعاع الغاوسي (Gaussian Beam Profile) مدمجاً بمعادلات انتقال الإشعاع الكلاسيكية التي تصف تأثيرات التشتت والامتصاص. تتيح هذه المحاكاة تشويه شكل الموجة الليزرية المستعادة، مما يمهّد الطريق لتطوير وتحسين خوارزميات استخلاص الأعماق ومعالجة الإشارات تحت ظروف بيئية افتراضية متباينة. يوضح الشكل (1) الآلية الفيزيائية والزمنية التي تعتمد عليها التقنية لقياس عمق المسطحات المائية باستخدام منصة جوية (طائرة مسيرة). حيث تبدأ العملية بقيام وحدة الليزر المحمولة جواً بإطلاق نبضة ضوئية قصيرة وعالية الطاقة من الليزر الأخضر. تظهر هذه النبضة في الرسم البياني المقابل كذروة حادة وضيقة تمثل "الإشارة المرسلة" عند اللحظة الزمنية الابتدائية، وتُتخذ كمرجع زمني لبدء الحساب.



الشكل (1): آلية رصد الأعماق وتوليد الشكل الموجي في أنظمة الليدار المائي الجوي.

عند وصول النبضة الليزرية إلى السطح البيني الفاصل بين الهواء والماء (Water Surface) ، ينعكس جزء من الطاقة الضوئية مباشرة نحو المستشعر. تسجل هذه الطاقة المرتدة الذروة الرئيسية الأولى في منحنى الإشارة المستلمة ويلاحظ أن هذه الذروة أعرض نسبياً من النبضة الأصلية بسبب تأثيرها بتموجات السطح وعمليات التشتت الأولية. ينفذ الجزء الأكبر من طاقة الليزر الأخضر داخل مياه المسطح المائي. وخلال رحلة الهبوط نحو القاع، يتعرض الشعاع لتشتت وامتصاص مستمر (يظهر في المخطط على شكل حزمة ضوئية تتسع تدريجياً كلما تعمقت). في المنحنى البياني، يُمثل هذا الوهن بالمنطقة المظلمة بلون أخضر باهت التي تربط بين ذروة السطح وذروة القاع، حيث تشير إلى الفوتونات التي تشتتت عائداً من عمق الماء قبل الوصول إلى القاع. عندما تصل الفوتونات المتبقية إلى قاع المسطح المائي (Water Bottom) ، تنعكس الطاقة المتبقية بناءً على طبيعة القاع وانعكاسيته، لتشكل الذروة الإشارية الأخيرة والمنخفضة في المنحنى الزمني.

5. النتائج والمناقشة:

5.1. نمذجة شعاع الليزر:

تتطلب محاكاة انتشار أشعة الليزر في الأوساط المائية صياغة نموذج رياضي يصف بدقة التغيرات الهندسية والإشارية التي تطرأ على النبضة الضوئية. ويتم ذلك عبر دمج الخصائص الهندسية للحزمة مع المعاملات الفيزيائية للوسط المائي وفقاً للمحددات التالية:

(أ) التوزيع الحجمي الغاوسي (Gaussian Beam Profile)

نبدأ بتحديد التوزيع المقطعي الأولي لشعاع الليزر عند المورد (المنصة الجوية) بافتراض حزمة غاوسية مثالية من الرتبة الصفريّة TEM_{00} حيث يُعرّف هذا التوزيع من خلال نصف قطر الخصر الأولي للحزمة والذي يرمز له بـ w_0 عند الموضع $z = 0$ ، بالإضافة إلى الطول الموجي لليزر $\lambda = 532nm$.

(ب) الانتشار الهندسي ومدى رايلي (Beam Propagation and Rayleigh Range)

عند انتقال الشعاع عبر المسافة الرأسية (Z) ، تبدأ الحزمة بالانفراج التدريجي ويتسع نصف قطرها. وتُحكم هذه العلاقة الهندسية بـ مدى رايلي (Rayleigh Range) والذي يُرمز له بـ z_R ؛ وهو المقياس الفيزيائي الذي يحدد المسافة التي تتضاعف عندها مساحة مقطع الشعاع (أو يزداد نصف قطره بمقدار $\sqrt{2}$)، ويُحسب رياضياً من العلاقة:

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2 \cdot n}{\lambda} \quad (1)$$

حيث يمثل n معامل انكسار الوسط المائي. وتأسيساً على ذلك، يتم نمذجة تغير نصف قطر الشعاع $w(z)$ كدالة للمسافة المقطوعة z باستخدام المعادلة التالية:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2)$$

ج) التوهين الإشعاعي بفعل الامتصاص والتشتت (Absorption and Scattering Attenuation)

لا يقتصر التغير على الأبعاد الهندسية للشعاع فحسب، بل يتعرض لضعف مستمر في شدته وطاقته نتيجة الخصائص البصرية للماء. لنمذجة هذا السلوك، يتم دمج معامل الامتصاص α ومعامل التشتت β المائيين. ويشكل مجموع هذين المعاملين ما يُعرف بمعامل التوهين الإجمالي (Total Attenuation Coefficient) ويرمز له بـ c :

$$c = \alpha + \beta \quad (3)$$

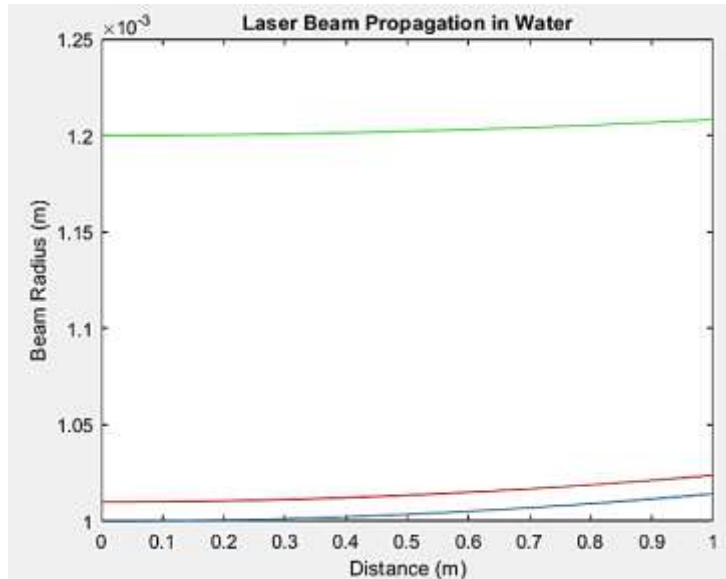
تخضع شدة الشعاع الإشعاعية $I(z)$ عند أي مسافة z لقانون بير-لامبرت (Beer-Lambert Law)، الذي يصف الاضمحلال الأسّي للطاقة نتيجة التفاعل الفيزيائي بين الفوتونات والوسط المائي، وتُصاغ المعادلة على النحو التالي:

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{-2r^2}{w(z)^2} \right) \exp(-c \cdot z) \quad (4)$$

حيث يمثل r المسافة النصف قطرية عن محور المركز للشعاع، ويمثل الجزء $\exp(-c \cdot z)$ الخسائر الإشعاعية الناتجة عن الامتصاص والتشتت في العمود المائي.

5.2. العلاقة بين اتساع الليزر والانتشار في البحر:

تُعدّ العلاقة بين محيط شعاع الليزر وانتشار المسافة في مياه البحر جانباً بالغ الأهمية في علم البصريات تحت الماء. فعندما يمر شعاع الليزر عبر مياه البحر، فإنه يتعرض للانحراف، مما قد يُغيّر محيطه - أضيق نقطة في الشعاع - تبعاً للمسافة التي يقطعها. ومع ازدياد المسافة، يتباعد الشعاع، مما يؤدي إلى اتساع محيطه.



الشكل (2) تأثير عرض شعاع الليزر على انتشار العمق في الماء

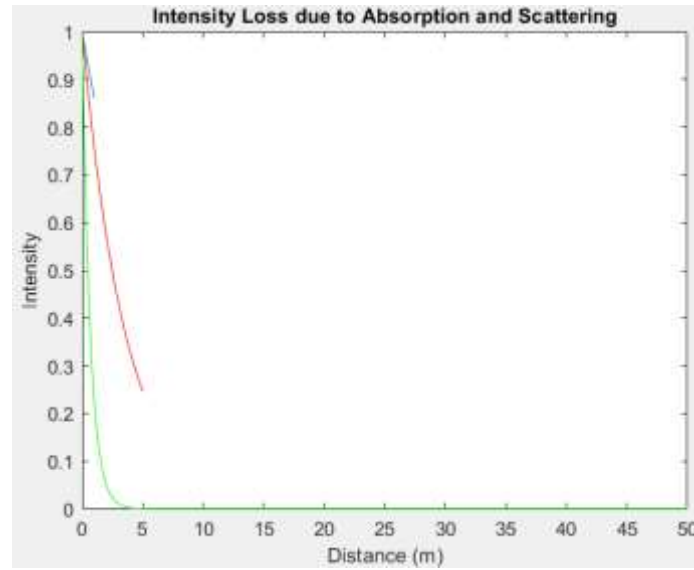
يوضح الشكل (2) هذا التأثير الاتساعي بعوامل مثل طول موجة الليزر وخصائص مياه البحر، بما في ذلك صفاتها ودرجة حرارتها. ففي المياه الأكثر صفاءً، يمكن للشعاع الحفاظ على محيط أصغر لمسافات أطول، مما يسمح بتركيز أفضل وتقليل التشتت. أما في المياه الأكثر عكارة، فيفقد الشعاع تماسكه بسرعة مع انتشاره، مما يقلل من شدته وتركيزه. يُعد فهم هذه العلاقة ضرورياً لتطبيقات مثل الاتصالات تحت الماء والاستشعار عن بُعد، حيث يؤثر الاستهداف الدقيق ووضوح إشارة الليزر بشكل كبير على فعالية التقنية المستخدمة.

5.3. تغيير معاملات الامتصاص:

يمثل محيط شعاع الليزر الموقع الذي يكون فيه قطر الشعاع عند أدنى حد له، مما يؤدي إلى أعلى شدته. يمكن أن تؤثر هذه الشدة بشكل كبير على كيفية تفاعل الضوء مع مياه البحر، التي تختلف معاملات امتصاصها تبعاً لعوامل مثل الطول الموجي وتركيب الماء. أثناء مرور الشعاع عبر مياه البحر، فإنه يصادف جزيئات مختلفة ومواد مذابة تمتص أطوالاً موجية محددة من الضوء، مما يقلل من شدتها. عندما تكون معاملات الامتصاص عالية، قد يلزم تعديل محيط الشعاع لضمان اختراق فعال وتقليل فقد الطاقة. إن فهم هذه العلاقة يُمكن الباحثين من تحسين تطبيقات الليزر، مثل الاتصالات تحت الماء ومراقبة البيئة، من خلال تصميم معلمات الليزر للتعامل مع التحديات الفريدة التي يمثلها امتصاص مياه البحر. وبالتالي، فإن تحسين محيط شعاع الليزر ضروري لتحقيق أقصى قدر من الأداء في البيئات البحرية.

يُمثل الشكل (3) التحقق العددي والعملي من قانون بير-لامبرت الذي صيغناه في القسم السابق، ويُظهر بوضوح كيف تتأثر شدة شعاع الليزر الأخضر بمسافة الاختراق الرأسية داخل أوساط مائية ذات خصائص بصرية متباينة. يُظهر الشكل نتائج المحاكاة العددية للتوهين الإشعاعي والاضمحلال الأسّي لشدة شعاع الليزر (Intensity) كدالة في مسافة الاختراق الرأسية (Distance) المقاسة بالمتري عبر العمود المائي، وذلك عند تطبيق قيم متباينة لمعامل التوهين الإجمالي.

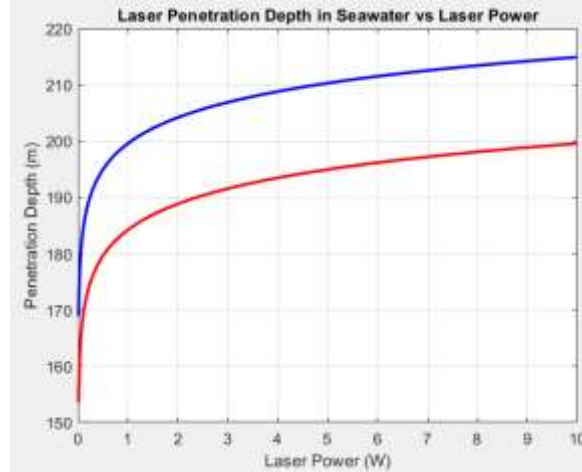
تُشير القراءة التحليلية للمنحنيات البيانية إلى السلوكيات الفيزيائية التالية. في المنحنى الأزرق يتم تمثيل المياه فائقة الصفاء حيث يُمثل هذا المنحنى بيئة مائية ذات معامل توهين منخفض جداً، حيث يحتفظ الشعاع بنحو 85% من شدته الأصلية عند اختراق المتر الأول. يشير هذا السلوك إلى تضائل تأثيرات الامتصاص والتشتت، مما يمنح الفوتونات قدرة نفاذية عالية تسهم في زيادة عمق الكشف الأقصى (Maximum Detection Depth) للنظام بشكل ملحوظ. أما بالنسبة للمنحنى الأحمر (المياه متوسطة العكارة / مياه الحالة الأولى النموذجية) فيُظهر هذا المنحنى هبوطاً أسياً واضحاً ومتسارعاً في طاقة الشعاع؛ حيث تفقد الحزمة الليزرية ما يقارب 75% من شدتها الابتدائية لتصل إلى عتبة 0.25 عند مسافة اختراق لا تتجاوز 5m. يرجع هذا السلوك الفيزيائي إلى تنامي دور التشتت المتعدد والامتصاص الجزيئي، مما يؤدي إلى وهن إشعاعي سريع يفرض تحديات حثيثة على خوارزميات استعادة الأعماق. يمثل المنحنى الأخضر (المياه عالية العكارة / البيئات النهرية والساحلية الحرجة) وهي الحالة التشغيلية الأكثر تعقيداً؛ حيث يعاني الشعاع من انهيار حاد وفوري في شدته (Sharp Exponential Decay)، لتتعدم طاقته كلياً قبل بلوغ مسافة 5m. هذا التلاشي الإشعاعي الخاطف يعود إلى الارتفاع الحاد في معامل التشتت الناتج عن الكثافة العالية للمواد العالقة والترسبات الطينية، وهو ما يفسر فيزيائياً الصعوبة البالغة التي تواجهها أنظمة الليدار الجوي في رصد قاع المسطحات النهرية العكرة.



الشكل (3) تأثير امتصاص مياه البحر على عمق انتقال الليزر داخل البحر

5.4. اختراق العمق مع تغيير الطاقة وقوة الليزر:

يُمثل عمق نفاذية شعاع الليزر داخل الوسط المائي ظاهرة فيزيائية محكومة ديناميكياً بكل من القدرة الابتدائية للنبضة والطول الموجي المستخدم. وكما تم توثيقه في الأقسام السابقة، يعاني الشعاع أثناء توغله الرأسي من اضمحلال تدريجي في شدته نتيجة لآليتي التشتت والامتصاص الجزيئي. ويوضح الشكل (4) بصورة جلية تأثير رفع القدرة الابتدائية (طاقة الليزر) على تعزيز عمق الاختراق؛ حيث تضمن الطاقة العالية تدفقاً فوتونياً كثيفاً يمتلك مرونة أكبر ومقاومة أعلى أمام عمليات الوهن الإشعاعي داخل العمود المائي. ونتيجة لذلك، يقتصر نفاذ الأنظمة منخفضة الطاقة على بضعة سنتيمترات أو أمتار محدودة قبل أن تتلاشى طاقتها دون القدرة على الارتداد، في حين تمكن النبضات عالية الطاقة الفوتونات من بلوغ أعماق أكبر وتوليد إشارة مرتدة من القاع ذات نسبة إشارة إلى ضوضاء (SNR) موثوقة. علاوة على ذلك، يتأثر سلوك النفاذية هذا ارتباطاً وثيقاً بالطول الموجي للشعاع؛ إذ يُظهر الماء سلوكاً انتقائياً حاداً تجاه الأطياف الكهرومغناطيسية. وخلافاً للأشعة تحت الحمراء (Infrared) التي تعاني من امتصاص مائي فوري وفائق الشدة عند السطح البيئي يمنعها من النفاذ، يقع الضوء المرئي—وتحديداً الليزر الأخضر عند طول موجي 532nm—ضمن النافذة البصرية المائية (Hydrological Optical Window) التي تسجل أدنى مستويات الامتصاص الفيزيائي. وتؤكد هذه النتائج أن الضبط المشترك والدقيق لكل من القدرة التشغيلية والطول الموجي يُمثل المفتاح الأساسي لتحسين أداء أنظمة الليدار المائي وتطبيقات الاتصالات والاستشعار عن بُعد في البيئات المائية المتباينة.

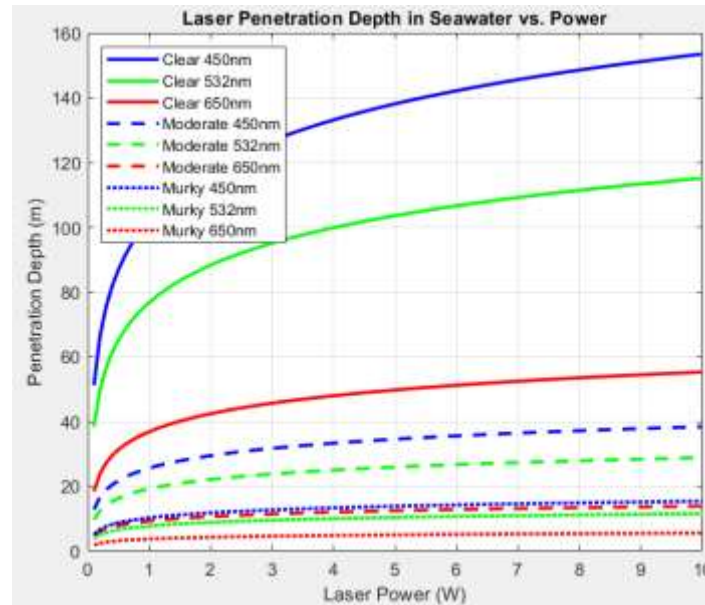


الشكل (4) تأثير قوة الليزر على عمق الاختراق

يُلاحظ من كلا المنحنيين (الأزرق والأحمر) أن عمق الاختراق يظهر استجابة حادة وفائقة السرعة عند زيادة القدرة في النطاق المنخفض 0W إلى 1W حيث يقفز العمق بشكل عمودي تقريباً من مستويات متدنية ليقترّب من عتبة 185m للمنحنى الأحمر و 200m للمنحنى الأزرق. ومع الاستمرار في رفع قدرة الليزر لتتجاوز 2W وصولاً إلى 10W، تتباطأ معدلات الزيادة في العمق بشكل ملحوظ لتتحول إلى سلوك شبه خطي ذي ميل ضئيل. يُعزى هذا الفيزيائي إلى أن الوهن الأساسي الناجم عن الامتصاص والتشتت المتعدد في الماء يمتص الزيادات الخطية في الطاقة، مما يعني أن مضاعفة قدرة الليزر لعدة مرات في النطاقات العالية لا تؤدي إلا إلى زيادة طفيفة ومحدودة في عمق النفاذية.

يُشكل الطول الموجي لشعاع الليزر الحاكم الفيزيائي الأول لآلية انتشار النبضات الضوئية وتفاعلها مع البيئة البحرية. إذ يتسم الوسط المائي بسلوك ترشيح واختيار حاد تجاه الطيف الكهرومغناطيسي، حيث تتفاوت قيم معامل الامتصاص α والتشتت β بشكل جوهري بناءً على الطول الموجي المختار. وتُثبت المعطيات الفيزيائية والمحاكاة العددية أن الأطوال الموجية القصيرة ضمن النطاق المرئي—وتحديداً الضوء الأزرق والأخضر الممتد في الحيز الموجي (450–532nm)—تتمتع بقدرة نفاذية فائقة داخل العمود المائي. يعود ذلك إلى انخفاض معامل الامتصاص الجزيئي للماء عند هذه الأطياف إلى حدوده الدنيا، مما يمنح الفوتونات مسار انتشار أطول ويجعلها الخيار المثالي والوحيد لتطبيقات الاستشعار عن بُعد (LiDAR)، والتصوير عالي الدقة، والاتصالات اللاسلكية تحت الماء. وفي المقابل، تعاني الأطوال الموجية الأطول—مثل الضوء الأحمر والأشعة تحت الحمراء—من امتصاص فوري وفائق الشدة من قِبل جزيئات الماء؛ حيث تتلاشى طاقتها بالكامل وتحترق عند السطح البيئي أو ضمن السنتيمترات الأولى من النفاذ، مما يجعل استخدامها مقصوراً على تعيين خط الساحل وتحديد سطح الماء فقط دون القاع. وعلاوة على هذه المحددات الطيفية الثابتة، تتدخل الحالة الهيدرو-بيولوجية لنقاء مياه البحر كعامل متغير إضافي يغير من سلوك الانتشار؛ حيث تؤدي زيادة مستويات العكارة (Turbidity) وارتفاع تركيزات المواد العضوية المذابة والجسيمات العالقة إلى تضخيم فوري في معامل التشتت β حتى للأطياف الخضراء. هذا التداخل يتسبب في انحراف مسارات الفوتونات وتشوه النبضة المستعادة، وهو ما يبرهن على أن فهم وتكامل العلاقة بين

الطول الموجي وطبيعة الوسط المائي يُعد حجر الزاوية لتطوير أنظمة ليدار مرنة وقادرة على التكيف مع البيئات البحرية والنهرية المختلفة لضمان نمذجة تضاريسية دقيقة.



الشكل (5) تأثير طول موجة الليزر على عمق الاختراق

يُمثل الشكل (5) مخرجات المحاكاة الشاملة لعمق الاختراق الأقصى لشعاع الليزر (Penetration Depth) كدالة في القدرة الابتدائية للمصدر (Laser Power) الممتدة من 0-10W وذلك عبر تقييم ثلاثة أطوال موجية متباينة 450-532-650nm وضمن ثلاث بيئات هيدرو-بصرية مختلفة من حيث مستويات العكارة. تُشير القراءة التحليلية المتقاطعة للمنحنيات البيانية إلى الاستنتاجات العلمية التالية:

• أولاً: بيئة المياه الصافية

تُظهر الخطوط المتصلة تفوقاً هائلاً للأطوال الموجية القصيرة في المياه عالية النقاء. يسجل الطول الموجي الأزرق 450nm أعلى كفاءة نفاذية على الإطلاق محققاً عمق اختراق أقصى يقارب 154m عند قدرة 10W، يليه الليزر الأخضر 532nm بعمق يصل إلى حوالي 115m. في المقابل، يظهر الطول الموجي الأحمر 650nm استجابة متدنية جداً حيث لا يتجاوز عمق نفاذيته عتبة 55m عند أقصى قدرة تشغيلية. يبرهن هذا التباين الحاد على أن الانتقائية الطيفية للماء في حالته النقية تحبذ النطاقين الأزرق والأخضر نتيجة لانخفاض معاملات الامتصاص الجزيئي لهما.

• ثانياً: بيئة المياه متوسطة العكارة

عند الانتقال إلى المياه متوسطة العكارة (الممثلة بالخطوط المنقطعة)، يلاحظ حدوث انهيار كبير وحاد في أعماق الاختراق لكافة الأطياف المختبرة، مع الحفاظ على التراتبية ذاتها. يتقلص العمق الأقصى لليزر الأزرق من 154m ليقف عند عتبة 38m فقط، بينما ينخفض الليزر الأخضر إلى نحو 28m، وينهار الأحمر دون مستوى 15m. هذا التراجع الحاد يعكس التأثير الفوري لارتفاع معامل التشتت الفيزيائي β الناجم عن الجسيمات العالقة المتوسطة، والتي تعمل على تشتيت الفوتونات وإخراجها من مسار الانتشار الرأسي.

• ثالثاً: بيئة المياه العكرة جداً

تُمثل المنحنيات المنقطة الحالة التشغيلية الأكثر حرجاً وتعقيداً؛ حيث تتقارب جميع المنحنيات وتتكدس في النطاق السفلي للمخطط البياني (بين 5m,15m). وفي هذه البيئة تحديداً، يلاحظ حدوث ظاهرة فيزيائية هامة وهي تلاشي الفروقات الطيفية جراء ظاهرة التشبع التشتتي؛ حيث يتقارب أداء الليزر الأزرق والأخضر بشكل كبير جداً (عند حدود 12m و 15m على التوالي)، بينما ينعدم نفاذ الليزر الأحمر تقريباً متأرجحاً دون عتبة 5m. يُعزى هذا السلوك إلى أن التشتت الكثيف والمستمر (Multiple Scattering) الناتج عن التراكيز المرتفعة للمواد العضوية والطيني يصبح هو العامل الحاكم والمسيطر على الوسط، مما يلغي الميزة التنافسية للنوافذ البصرية للأطوال الموجية القصيرة.

6. النتائج والمناقشة:

تؤكد نتائج المحاكاة والتحليل الفيزيائي المتكامل أن كفاءة وموثوقية أنظمة قياس الأعماق بالليزر المحمول جواً (ALB) تظل محكومة بديناميكية السطح البيئي الفاصل بين الهواء والماء، إلى جانب الخصائص الطيفية والبيئية للوسط المائي. وتتلخص أبرز الاستنتاجات المستخلصة من هذا العمل في أن عدم استواء سطح البحر نتيجة حركة الأمواج المستمرة يحدث تغييراً آنياً في زاوية سقوط النبضات الليزرية، مما يتسبب في انكسار غير متجانس للشعاع (Refraction Variability) يقود بدوره إلى أخطاء منهجية في حساب المسافة العمودية وانحراف دقة الأعماق المستعادة. وعلاوة على ذلك، يمتد تأثير هذه الأمواج ليسبب اضطراباً ميكانيكياً في الطبقات المائية العليا، مما يضاعف من معدلات التشتت الضوئي والتشوه الإشعاعي (Scattering & Distortion) وينعكس على شكل ضجيج حاد في الإشارات المرتدة يُضعف من قدرة الخوارزميات التقليدية على التحديد الدقيق لنقطة الانعكاس القاعية. ومن جهة أخرى، أظهرت النمذجة أن ظاهرة تشكّل الفقاعات والرغوة البيضاء (Bubbles & Foam) عند قمم الأمواج تُشكل عائقاً بصرياً حرجاً يعكس ويمتص جزءاً كبيراً من طاقة الشعاع قبل نفاذه، مما يؤدي إلى خسارة كمية من التدفق الفوتوني وتقليص مدى العمق الأقصى القابل للقياس. ونظراً للطبيعة الديناميكية المتغيرة زمنياً للأمواج (Temporal Variations)، فإن كل نبضة ليزرية تواجه تضاريس سطحية مختلفة، مما يفسر تذبذب القياسات المستمرة ويفرض حاجة ماسة لدمج مرشحات رياضية متقدمة (Filtering Algorithms) أو اعتماد تقنيات أخذ المتوسط الإحصائي لنبضات متعددة لتقليل هوامش الخطأ. تخلص هذه الدراسة إلى أن تجاوز العقبات الفيزيائية الخمس المذكورة يستدعي إلزامية تطبيق خوارزميات ديناميكية متطورة لتصحيح الانكسار (Refraction Correction) ومعالجة الإشارات بناءً على النمذجة الرياضية المسبقة لحالة السطح، وهو ما يمهد الطريق في الأبحاث المستقبلية لتطوير حلول برمجية قادرة على تحسين الاستكشاف الهيدروغرافي في البيئات الساحلية والنهرية المضطربة.

References:

- [1] J. He, J. Lin, M. Ma, and X. Liao, "Mapping topo-bathymetry of transparent tufa lakes using UAV-based photogrammetry and RGB imagery," *Geomorphology*, vol. 389, p. 107832, 2021. doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107832.
- [2] S. Szombara, P. Lewińska, A. Żądło, M. Róg, and K. Maciuk, "Analyses of the Prądnik riverbed shape based on archival and contemporary data sets—old maps, LiDAR, DTMs, orthophotomaps and cross-sectional profile measurements," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 14, p. 2208, 2020. doi: 10.3390/rs12142208.
- [3] S. Li, D. Su, F. Yang, H. Zhang, X. Wang, and Y. Guo, "Bathymetric LiDAR and multibeam echo-sounding data registration methodology employing a point cloud model," *Applied Ocean Research*, vol. 123, p. 103147, 2022. doi: 10.1016/j.apor.2022.103147.
- [4] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy, 2000. Accessed on: Oct. 29, 2022. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>.
- [5] A. Bieda and R. Hycner, "Changes in the shape of the river-bed over a period of time at the base of the Vistula river before Cracow," *Geomatics and Environmental Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 21–28, 2012. doi: 10.7494/geom.2012.6.1.21.
- [6] E. Kasvi, J. Salmela, E. Lotsari, T. Kumpula, and S. N. Lane, "Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers," *Geomorphology*, vol. 333, pp. 180–197, 2019. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.02.017.
- [7] M. J. McCarthy, D. B. Otis, D. Hughes, and F. E. Muller-Karger, "Automated high-resolution satellite-derived coastal bathymetry mapping," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 107, p. 102693, 2022. doi: 10.1016/j.jag.2022.102693.
- [8] S. Phinn, C. Roelfsema, A. Dekker, V. Brando, and J. Anstee, "Mapping seagrass species, cover and biomass in shallow waters: An assessment of satellite multi-spectral and airborne hyper-spectral imaging systems in Moreton Bay (Australia)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, no. 8, pp. 3413–3425, 2008. doi: 10.1016/j.rse.2007.09.017.
- [9] T. Kutser, J. Hedley, C. Giardino, C. Roelfsema, and V. E. Brando, "Remote sensing of shallow waters—A 50 year retrospective and future directions," *Remote Sensing of Environment*, vol. 240, p. 111619, 2020. doi: 10.1016/j.rse.2019.111619.
- [10] J. Velasco, I. Molina, E. Martinez, Á. Arquero, and J. F. Prieto, "Sea Bottom Classification by Means of Bathymetric LiDAR Data," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 4, pp. 590–595, 2014. doi: 10.1109/TLA.2014.6868859.
- [11] R. Gawalkiewicz and D. Madusiok, "The Bagry Reservoir. Pt. 3, The application of hydro-drone Smart-Sonar-Boat in bathymetric measurements of inaccessible water areas," *Geoinformatica Polonica*, vol. 17, pp. 17–30, 2018. doi: 10.4467/21995923GP.18.002.9159.
- [12] R. P. Mason and G.-R. Sheu, "Role of the oceans in the global mercury cycle," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 16, no. 4, pp. 40-1-40-14, Dec. 2002.
- [13] J. M. Adkins, "The role of ocean circulation in global climate change," *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 75, pp. 112-125, May 2013.

- [14] J. P. Barry et al., "The impacts of ocean acidification on marine ecosystems," *Oceanography*, vol. 24, no. 2, pp. 54-67, Jun. 2011.
- [15] P. Regnier et al., "The role of the ocean carbon cycle in the global climate system," *Nature*, vol. 603, no. 7901, pp. 415-428, Mar. 2022.
- [16] M. Amani et al., "Satellite remote sensing for oceanic and coastal monitoring: A review," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 8, p. 1823, Apr. 2022.
- [17] A. Rani et al., "Remote sensing of ocean color: Progress and challenges," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 102, p. 102435, Oct. 2021.
- [18] M. Blondeau-Patissier et al., "A review of ocean color remote sensing methods and applications," *Progress in Oceanography*, vol. 123, pp. 123-144, Apr. 2014.
- [19] C. Hu, "A novel ocean color index to detect floating algae in the global ocean," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 10, pp. 2118-2129, Oct. 2009.
- [20] P. Guan et al., "Limitations of passive optical sensors in night-time ocean monitoring," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 17, no. 9, pp. 1245-1256, Sep. 2000.
- [21] T. Culster et al., "Challenges in passive satellite remote sensing under low solar angles," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1-12, Jan. 2024.
- [22] J. H. Churnside and J. A. Shaw, "Active optical remote sensing of the aquatic environment using LiDAR," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 72, p. 100265, Jul. 2020.
- [23] C. Jamet et al., "Going beyond ocean color: LiDAR remote sensing of the aquatic environment," *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, p. 251, May 2019.
- [24] W. Shangguan et al., "Advanced oceanic LiDAR for vertical profiling of water optical properties," *Optica*, vol. 11, no. 2, pp. 195-208, Feb. 2024.
- [25] T. Culster et al., "Airborne LiDAR profiling of marine ecosystems," *Remote Sensing of Environment*, vol. 210, pp. 145-158, Jun. 2018.
- [26] Z. Yuan et al., "Laser-induced backscattering for ocean subsurface profiling," *Optics Express*, vol. 30, no. 14, pp. 24510-24525, Jul. 2022.
- [27] X. Bao et al., "Measurement of ocean temperature and salinity profiles using Brillouin LiDAR," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 151, p. 106901, Apr. 2022.
- [28] F. Gao et al., "Ocean temperature and salinity profiling with a shipborne LiDAR system," *Applied Physics B*, vol. 84, no. 3, pp. 523-529, Aug. 2006.
- [29] J. Moisan et al., "Global scale monitoring of ocean subsurface temperature gradients via satellite LiDAR," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 3, p. 542, Feb. 2024.
- [30] R. Spence et al., "A comparative study on optical estimation of ocean salinity profiles," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 129, no. 5, e2023JC020114, May 2024.
- [31] Y. Wang et al., "Retrieval of ocean subsurface salinity using automated active LiDAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 20, pp. 1-5, Aug. 2023.
- [32] J. Yang and W. Shangguan, "Laser remote sensing of temperature and salinity in stratified waters," *Applied Optics*, vol. 62, no. 18, pp. 4812-4821, Jun. 2023.
- [33] I. Yu et al., "Development of an airborne LiDAR for subsurface oceanographic measurements," *Chinese Optics Letters*, vol. 12, no. 9, pp. 090101-090105, Sep. 2014.
- [34] Y. Li et al., "Optical remote sensing of oil spills on the sea surface using polarized LiDAR," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 86, no. 1-2, pp. 312-321, Sep. 2014.
- [35] Y. Li et al., "Laser fluorosensor for oil spill identification and thickness estimation," *Optical Engineering*, vol. 55, no. 4, p. 044103, Apr. 2016.

- [36] A. Samberg, "Oil spill detection and classification using airborne laser fluorosensors," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no. 15, pp. 3255-3268, Aug. 2005.
- [37] W. Shanguan et al., "Fluorescence LiDAR mapping of oil slick distributions in coastal zones," *Environmental Science & Technology*, vol. 57, no. 42, pp. 15980-15991, Oct. 2023.
- [38] J. C. B. Magalhaes et al., "Observations of oceanic internal waves using airborne LiDAR," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 43, no. 8, pp. 1650-1662, Aug. 2013.
- [39] J. H. Churnside et al., "High-resolution observations of internal waves in the ocean using a airborne LiDAR," *Oceanography*, vol. 25, no. 2, pp. 42-51, Jun. 2012.
- [40] J. H. Churnside and J. R. Hunter, "Laser remote sensing of fish schools," *Fisheries Oceanography*, vol. 5, no. 3-4, pp. 220-230, Sep. 1996.
- [41] J. H. Churnside et al., "Airborne LiDAR for fisheries applications," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 11, p. 1153, Nov. 2017.
- [42] P. McCarron et al., "Subsurface target detection and tracking via automated airborne LiDAR," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 1045-1058, Oct. 2023.
- [43] W. Shanguan et al., "Deep learning-based classification of underwater targets from LiDAR backscatter profiles," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 54, no. 5, pp. 2910-2923, May 2024.
- [44] G. D. Hickman and J. E. Hogg, "Application of an airborne laser to bio-organic mapping and bathymetry in coastal waters," *Remote Sensing of Environment*, vol. 1, no. 1, pp. 47-58, Mar. 1969.
- [45] W. Shanguan et al., "High-resolution shallow water bathymetry mapping via airborne photon-counting LiDAR," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 199, pp. 85-98, May 2023.
- [46] O. Steinvall et al., "Airborne laser depth sounding: System aspects and performance," *Applied Optics*, vol. 32, no. 33, pp. 6799-6812, Nov. 1993.
- [47] H. Tries, "Shipborne LiDAR systems for dynamic oceanographic parameter observation," *Journal of Marine Technology Society*, vol. 48, no. 3, pp. 34-45, May 2014.
- [48] L. J. Mullen et al., "Application of RADAR technology to aerial LiDAR systems for underwater target detection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 9, pp. 2360-2370, Sep. 1995.
- [49] S. Abdallah et al., "Spaceborne LiDAR engineering and feasibility for global ocean depth profiling," *Space Science Reviews*, vol. 172, no. 1-4, pp. 203-215, Dec. 2012.
- [50] P. Chen et al., "Global ocean subsurface optical properties retrieved from CALIPSO LiDAR observations," *Remote Sensing of Environment*, vol. 224, pp. 121-133, Apr. 2019.
- [51] W. Shanguan et al., "Development of an underwater single-photon LiDAR for deep-sea structural inspection," *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, no. 6, pp. 1-10, Dec. 2023.
- [52] W. Shanguan et al., "Performance modeling of an optimization framework for submerged single-photon oceanic LiDAR," *Optics Letters*, vol. 49, no. 8, pp. 2105-2108, Apr. 2024.
- [53] C. E. Parrish et al., "Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry in clear water environments," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 21, p. 2560, Nov. 2019.