

Meningkatkan Produktivitas Kerja Lapangan Dalam Karakterisasi Bawah Permukaan: Kemajuan Dalam Akuisisi Data Dengan MASW-DS

Aki' Suprpto¹ dan Dito Aditorio²
¹CV. Najah Consultant, Sumenep
E-mail:Suprpto.pranaja@yahoo.com

ABSTRAK: Metode multichannel analysis of surface waves (MASW) menggunakan gelombang permukaan frekuensi rendah untuk mengkarakterisasi lapisan bawah permukaan yang dangkal. Metode ini merupakan alat yang sangat berguna dalam rekayasa geoteknik untuk mengevaluasi kualitas tanah dan memetakan karakteristik lapisan sedimen atas. Terlepas dari efisiensinya, produktivitas MASW konvensional yang terbatas karena proses akuisisi datanya yang relatif lambat, menjadi tantangan tersendiri untuk dikembangkan, terutama untuk proyek-proyek berskala besar. Untuk mengatasi masalah ini, kami memperkenalkan analisis multialuran gelombang permukaan dengan menggunakan teknik dual streamer (MASW-DS) untuk meningkatkan produktivitas kerja lapangan. Pendekatan ini melibatkan penarik dua streamer geofon darat paralel di belakang truk dan secara bersamaan memungkinkan akuisisi data MASW dengan satu sumber, yang diaktifkan di antara dua pita darat. Studi kami mengevaluasi akurasi dan efektivitas teknik MASW-DS yang diusulkan melalui serangkaian tes data sintetis dan data nyata dan menunjukkan potensinya untuk mempercepat survei yang menghasilkan pengurangan biaya proyek. Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa MASW-DS memberikan kinerja yang sebanding dengan MASW konvensional, bahkan pada kondisi geologi yang menantang. Teknik yang diusulkan menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan secara statistik pada kurva dispersi yang diperoleh (perbedaan absolut rata-rata sebesar 1,92%) dan berhasil mereproduksi profil gelombang-S yang dihasilkan dari penggunaan MASW konvensional, dalam kerangka akurasi yang dapat diterima oleh para insinyur. Hasil yang diberikan membuktikan keandalan teknik MASW-DS untuk karakterisasi bawah permukaan sekaligus mencapai penghematan waktu akuisisi yang signifikan. Dengan demikian, teknik MASW-DS yang diusulkan dapat digunakan sebagai alat yang berharga dan efektif untuk investigasi geoteknik dan proyek-proyek teknik sipil di seluruh dunia.

Kata Kunci: MASW, Dual streamer, Akuisisi data MASW, Produktivitas kerja lapangan MASW, Geofisika.

1. PENDAHULUAN

Metode Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) menggunakan gelombang permukaan dengan frekuensi rendah, biasanya berkisar antara 1 hingga 30 Hz [1], [2]. Tujuan utama dari MASW adalah untuk mengeksplorasi karakteristik dispersi dari gelombang permukaan ini, yang memungkinkan pembuatan profil kecepatan gelombang geser bawah permukaan. Metode ini beroperasi pada kedalaman yang dangkal, biasanya dalam kisaran beberapa meter hingga beberapa puluh meter di bawah permukaan laut. Metode MASW telah terbukti efisien dalam berbagai aplikasi, termasuk karakterisasi lokasi untuk penilaian bahaya seismik [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Metode MASW memainkan peran penting dalam mengevaluasi kualitas tanah dan lapisan sedimen bagian atas (sepersepuluh meter), terutama untuk aplikasi di industri konstruksi dan pembangunan Gedung [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]. Penerapan MASW dalam rekayasa geoteknik semakin diakui karena kemampuannya dalam mengkarakterisasi perilaku mekanik bawah permukaan [19], [20], [21], [22], [23], [24]. Karakterisasi ini dicapai dengan memperkirakan model kecepatan gelombang geser satu dimensi (1D) atau dua dimensi (2D). Selanjutnya, model-model kecepatan ini dapat dikorelasikan baik secara langsung maupun tidak langsung, dengan berbagai karakteristik mekanik bawah permukaan seperti kekakuan, modulus elastisitas, saturasi air, dan parameter-parameter lain yang relevan [25], [26], [27]. Hal ini menyoroti semakin pentingnya MASW sebagai metode geofisika yang efektif dalam bidang rekayasa geoteknik.

Rekaman gelombang permukaan dikumpulkan dengan menggunakan lebih dari 12 geofon frekuensi rendah dan satu sumber (misalnya, palu godam atau pemberat yang

dijatuhkan) yang disejajarkan dengan garis survei. Untuk membuat penampang kecepatan geser 2D, teknik "roll-along" diterapkan. Dalam metode ini, semua geofon digeser pada jarak tertentu (pergerakan sumber-penerima) setelah setiap pemotretan, dengan mempertahankan pergeseran sumber dan panjang larik penerima yang konsisten. Urutan ini berulang hingga seluruh jalur yang diselidiki tercakup, sehingga prosesnya memakan waktu. Teknik MASW, yang dulunya dianggap lambat dalam hal waktu akuisisi data, telah berubah menjadi metode yang relatif cepat dengan diperkenalkannya pita tanah [17], [28], [29]. Saat ini, penggunaan land streamer yang ditarik oleh truk di medan yang jelas dan datar sangat diperlukan, sehingga secara signifikan meningkatkan produktivitas akuisisi. Namun demikian, ketika area yang luas membutuhkan investigasi dengan pengambilan sampel yang cukup padat (geophone dan jarak profil), waktu akuisisi data merupakan salah satu faktor yang paling penting dalam survei. Dalam proyek konstruksi, waktu memainkan peran penting dalam menentukan biaya proyek. Oleh karena itu, pengurangan substansial dalam waktu akuisisi data akan berdampak signifikan terhadap biaya proyek.

Wilayah Dewan Kerja Sama Teluk (GCC) adalah terkenal dengan proyek-proyek konstruksi berskala besar. Karena kondisi geologi yang spesifik di daerah-daerah tersebut, sangat penting untuk mengidentifikasi zona-zona lemah dan ikatan-ikatan gua untuk menjamin keamanan struktur-struktur tersebut. Metode geofisika permukaan, khususnya, telah menjadi lazim digunakan dalam aplikasi semacam itu [30], [31]. Khususnya, di wilayah seperti Emirat Abu Dhabi, melakukan survei geofisika untuk zona lemah dan deteksi rongga merupakan hal yang wajib dilakukan untuk mendapatkan izin mendirikan bangunan untuk proyek konstruksi apa pun (AAM-Pedoman Studi

Geofisika 2010; Panduan Penyelidikan Geoteknik dan Panduan Desain Geoteknik 2021 Dokumen No: TR-509). Metode Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi zona lemah bawah permukaan dan rongga di wilayah ini, karena karakteristik geologi yang unik di daerah tersebut [16], [32], [33], [34], [35]. Mengingat luasnya area yang perlu dicakup oleh metode ini, seringkali melebihi 1000 hektar dalam proyek-proyek seperti Zayed City (Abu Dhabi Property 2009) dan Ruwais Derivative Park di Ruwais, Abu Dhabi (Teknologi Lepas Pantai 2021), pengurangan waktu yang diperlukan untuk akuisisi data MASW akan berdampak signifikan terhadap keseluruhan biaya proyek-proyek ini.

Dalam penelitian ini, tujuan utama kami adalah untuk menilai keakuratan dan keefektifan teknik akuisisi data yang baru, yang kami sebut Multichannel Analysis of Surface Waves-Dual Streamer (MASW-DS). Pendekatan inovatif ini bertujuan untuk melipatgandakan produktivitas kerja lapangan. Metode ini melibatkan penarik dua streamer darat yang dipasang pada dua seismo-grafik yang berbeda secara bersamaan di belakang truk, dengan menggunakan satu sumber untuk setiap pemotretan dan menggunakannya untuk kedua array geophone. Hal ini memungkinkan akuisisi data secara simultan dari dua profil MASW yang berdekatan, yang secara substansial mengurangi waktu kerja lapangan. Terlepas dari kesederhanaannya dan kurangnya ketergantungan pada peralatan yang rumit, MASW-DS memiliki potensi untuk mempercepat survei secara signifikan di area yang luas, sehingga mengurangi biaya proyek secara signifikan. Penerapan teknik ini tidak hanya terbatas pada bidang teknik, tetapi juga mencakup studi lingkungan dan penilaian bahaya seismik di area yang luas.

Akan tetapi, pemrosesan data yang diperoleh melalui MASW-DS memperkenalkan beberapa asumsi yang secara substansial dapat mempengaruhi profil gelombang-S yang dihasilkan. Meskipun metode ini telah menunjukkan aplikasi yang sukses dalam bidang Teknik [36], [37], evaluasi yang komprehensif terhadap akurasi dan efisiensinya masih kurang. Hasil awal dari pengujian data sintetis dan data riil telah dipublikasikan oleh para penulis, sebelumnya, tetapi penelitian ini bertujuan untuk memberikan evaluasi menyeluruh terhadap keakuratan teknik MASW-DS yang diusulkan. Metodologi teknik ini pertama-tama diusulkan dan dianalisis dari perspektif fisik. Selanjutnya, dua set data sintetis dan empat set data riil dari berbagai lokasi digunakan untuk menilai efisiensi dan akurasi teknik baru ini. Lubang bor dibor di semua lokasi data riil untuk memverifikasi temuan teknik yang diusulkan.

Pengaturan eksperimental yang inovatif untuk melakukan pengukuran MASW ini memberikan nilai tambah pada pengukuran Gelombang Permukaan. Hal ini menarik bagi komunitas ilmiah karena pengurangan substansial dalam waktu dan biaya untuk survei MASW di area yang luas, di mana kondisi permukaan memungkinkan. Hasil penelitian kami menunjukkan hasil yang sangat menggembirakan untuk penerapan dan akurasi MASW-DS, yang dibuktikan melalui set data sintetis dan data nyata. Namun, perlu ditekankan bahwa

penerapan teknik akuisisi yang diusulkan sangat dipengaruhi oleh kondisi medan di lapangan, yang berarti bahwa teknik ini tidak dapat diterapkan jika kondisi medan pada umumnya kasar

2. Metodologi dan Dataset

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data sintetis dan data seismik riil yang diakuisisi dengan menggunakan teknik MASW-DS baru dan metode MASW konvensional. Kami menghasilkan data sintetis menggunakan paket perangkat lunak 3D SW4 untuk lapisan horizontal dan Model 2.5D untuk mengevaluasi penerapan teknik MASW-DS. Kami mengumpulkan data nyata dari empat lokasi berbeda di Abu Dhabi, UEA, termasuk Sweihan, Bani Yas, Pulau Yas, dan Pulau Jubail. Setiap lokasi dipilih berdasarkan kondisi geologi yang berbeda-beda dan kesesuaiannya untuk survei MASW-DS. Uji coba lapangan melibatkan pengumpulan data di sepanjang garis MASW paralel yang berjarak 5 m, dengan masing-masing garis dilengkapi dengan 24 geophone dengan interval 2m. Pengumpulan data riil bertujuan untuk memvalidasi teknik MASW-DS terhadap metode MASW konvensional dengan membandingkan kurva dispersi, profil kecepatan gelombang-S, dan penampang semu yang dihasilkan dari kedua teknik tersebut. Informasi kebenaran tanah diperoleh dari lubang bor geoteknik terdekat untuk memastikan keakuratan dan keandalan hasil.

Identifikasi zona lemah dan rongga bawah permukaan, dengan menggunakan metode MASW, menuntut cakupan yang luas dari area yang ditentukan untuk diinvestigasi. Untuk mencapai hal ini, serangkaian garis MASW paralel biasanya digunakan dengan menggunakan teknik akuisisi roll-along. Profil Vs (distribusi kecepatan gelombang-S dengan kedalaman) kemudian dihasilkan dengan membalikkan kurva dispersi fundamental gelombang permukaan dari masing-masing pengumpulan bidikan. Dengan menggabungkan profil Vs yang berdekatan, penampang semu dibuat di sepanjang setiap garis MASW (2D-MASW). Resolusi metode dalam setiap penampang semu terutama dikontrol oleh panjang larik seismik dan spasi geofon (dx), sedangkan resolusi lateral di sepanjang arah garis dipengaruhi oleh jarak antara garis seismik (dp). Praktik yang umum dilakukan adalah dengan menggunakan jarak garis 2-3 kali spasi geofon (2-3 dx) untuk memastikan cakupan lateral yang memadai. Peningkatan array sumber-penerima (dsr) dalam akuisisi roll-along, sering kali diatur pada dua hingga empat kali spasi geofon, tergantung pada resolusi spasial lateral yang diinginkan di sepanjang penampang semu. Sebuah streamer darat yang dilengkapi dengan satu set 12 hingga 48 geofon biasanya digunakan, ditarik oleh sebuah truk di sepanjang garis MASW yang telah ditentukan, dengan peningkatan sumber-penerima (dsr) yang akan dieksekusi setelah setiap pengambilan gambar (roll-along). Untuk penampang semu dengan panjang X meter, jumlah total pemotretan yang diperlukan adalah $N = ((X/dsr)+1)$. Jika diperlukan Y profil untuk keseluruhan situs, maka jumlah total bidikan yang diperlukan adalah $N \times Y$.

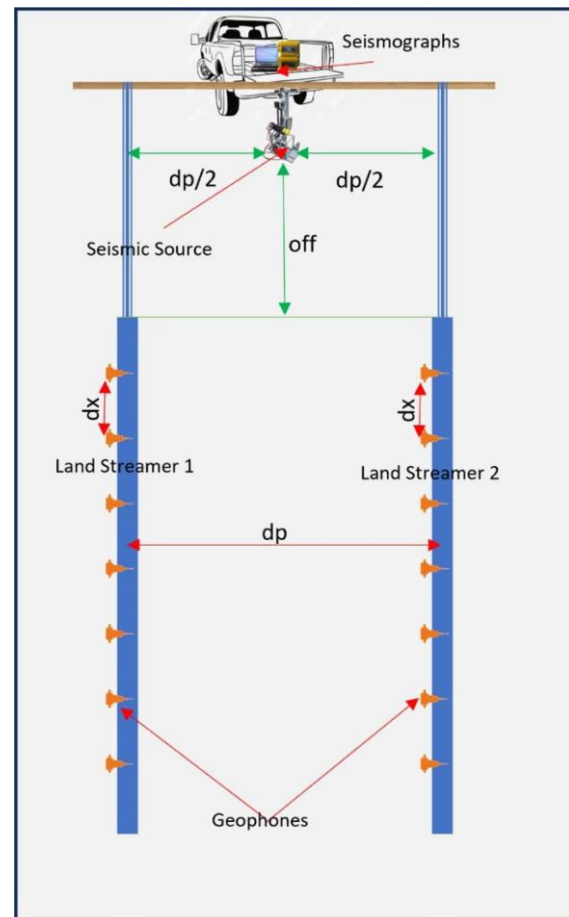
Jumlah keseluruhan bidikan yang diperlukan untuk meng- yang cukup mencakup area yang luas dan diselidiki, dapat dikurangi separuhnya dengan merekam

respons dua garis MASW 2D secara bersamaan untuk satu bidikan. Optimalisasi ini dicapai dengan memanfaatkan pendekatan MASW-DS. Berbeda dengan metode konvensional yang melibatkan satu streamer tanah yang ditarik oleh truk sejajar dengan lokasi sumber (in-line), MASW-DS melibatkan penggunaan dua streamer tanah, dengan mempertahankan jarak pemisahan konstan yang dilambangkan sebagai dp . Balok kayu berukuran 5-6 m yang dipasang di bagian belakang truk (Gbr. 1) digunakan untuk menjaga jarak 5 m yang konsisten antara dua land streamer paralel. Setiap land streamer dilengkapi dengan 24 geofon frekuensi rendah yang berjarak 2 m. Kedua land streamer ini dapat dihubungkan ke dua seismograf terpisah atau satu seismograf yang dilengkapi dengan dua kali jumlah saluran pada setiap land streamer. Sumber seismik yang kuat dan dapat diulang, seperti jatuhnya beban atau palu godam, diposisikan di depan land streamer ganda. Sumber ini terletak pada jarak yang dekat dengan offset dan pada titik tengah (off-line) di antara dua land streamer, khususnya pada jarak $dp/2$ (2,5 m dalam kasus kami, lihat Gbr. 1). Akibatnya, untuk total panjang penampang semu MASW (X), jumlah pemotretan yang digunakan (N) akan dialokasikan untuk merekam dua jalur 2D-MASW secara bersamaan. Pendekatan ini mengurangi jumlah keseluruhan pemotretan yang diperlukan per lokasi menjadi $N \times Y/2$, terutama ketika berhadapan dengan jumlah garis seismik 2D-MASW yang genap.

Untuk mengoreksi geometri sumber-ke-penerima dalam konfigurasi ganda, jarak geometri aktual (Pythagorean) antara sumber off-line dan masing-masing penerima dapat digunakan dalam analisis kurva dispersi. Pendekatan ini memastikan bahwa transformasi medan gelombang dari domain time-offset ($t-x$) ke domain frekuensi-kecepatan ($f-v$) konsisten dengan teknik MASW konvensional. Data direkam secara simultan di kedua array receiver menggunakan eksitasi sumber tunggal, yang menghilangkan variasi akibat pemotretan berulang dan mencegah crosstalk di antara array, karena receiver tidak mempengaruhi perambatan gelombang seismik.

Terlepas dari kesederhanaan dan kemandiriannya yang melekat pada instrumentasi yang canggih, metode MASW-DS memiliki potensi yang besar untuk mempercepat survei di area yang luas, sehingga menawarkan pengurangan biaya yang signifikan dalam pelaksanaan proyek. Tantangan utama dalam mengimplementasikan teknik MASW-DS terletak pada persyaratan kondisi lokasi yang sesuai, karena metode ini bergantung pada kelancaran dan simultan dari dua pita tanah. Hal ini membutuhkan medan yang relatif datar dan bebas hambatan; keberadaan pepohonan, tanah yang tidak rata, atau penghalang fisik lainnya dapat menghambat operasi dan mengganggu kualitas data atau kontinuitas akuisisi.

Analisis yang akurat dari kurva dispersi gelombang permukaan Rayleigh sangat penting untuk menghasilkan penampang semu yang dapat diandalkan selama pemrosesan data. Ketika jarak sumber-ke-penerima yang sebenarnya (yaitu, offset Pythagorean) digunakan, teknik MASW-DS bergantung



Gbr. 1 Representasi konfigurasi lapangan MASW-DS

pada asumsi utama yang sama yang mempengaruhi profil gelombang-S yang dihasilkan dalam metode MASW konvensional. Asumsi-asumsi ini meliputi: (1) ekstraksi kurva dispersi berdasarkan asumsi gelombang permukaan bidang, bukan gelombang silinder (yang akan memperhitungkan efek medan dekat), dan (2) inversi kurva dispersi dengan asumsi medium berlapis horizontal (1D). Namun, ketidakakuratan dapat muncul dalam transformasi medan gelombang dari time- offset ($t-x$) ke domain frekuensi-fase kecepatan ($f-v$) jika offset sebaris digunakan sebagai pengganti offset geometris yang sebenarnya. Dalam penelitian ini, perhatian khusus diberikan pada dampak offset sumber ganda (in-line dan off-line) pada akurasi evaluasi kurva dispersi. Penelitian sebelumnya [33] telah menunjukkan bahwa kurva dispersi yang berasal dari geometri sumber-penerima 2D dapat dianalisis secara efektif dengan menggunakan metode transformasi medan gelombang konvensional di bawah asumsi media 1D, asalkan jarak geometris yang sebenarnya digunakan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi keandalan teknik akuisisi data baru ini (MASW-DS) dibandingkan dengan teknik MASW konvensional. Investigasi kami berfokus pada evaluasi hasil akuisisi yang diusulkan (kurva dispersi dan profil gelombang-S) yang akurat melalui uji coba data seismik sintetik dan data seismik riil. Untuk mencapai hal ini,

teknik yang diusulkan menjalani pengujian di empat lokasi yang berbeda, dengan data riil yang diperoleh kemudian dilakukan analisis komparatif terhadap hasil yang sesuai yang disimpulkan dari teknik MASW konvensional. Selain itu, kumpulan data sintesis 2D dan 3D dihasilkan dengan menggunakan teknik akuisisi data konvensional dan teknik MASW-DS, yang memfasilitasi perbandingan komprehensif dari hasil masing-masing.

3. Hasil

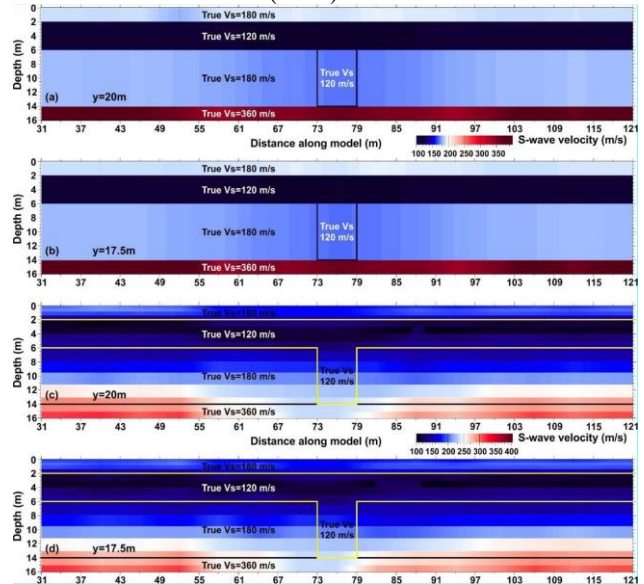
Pada awalnya, kelayakan teknik MASW-DS dinilai melalui pemanfaatan data seismik sintetik yang diperoleh dari konfigurasi sumber-penerima tertentu yang diterapkan pada model 2.5D berlapis horizontal dan model 2.5D. Untuk dataset ini, simulasi penjalaran gelombang seismik dilakukan dengan menggunakan paket perangkat lunak 3D SW4, yang disediakan oleh Computational Infrastructure for Geodynamics (CIG) [38].

Model 1D asli yang digunakan untuk mengevaluasi penerapan konfigurasi MASW-DS didasarkan pada model yang diperkenalkan oleh [39], yang terdiri dari tiga lapisan horizontal di atas setengah ruang. Lapisan kedua dikarakterisasikan sebagai Lapisan Kecepatan Rendah (LVL). Kepadatannya ditetapkan secara tunggal pada 1,8 g/cm³. Gambar 2 mengilustrasikan representasi ulang dari model yang digunakan, termasuk kecepatan gelombang P dan S yang ditetapkan. Untuk menilai MASW-DS dalam 2.5D, versi modifikasi dari model yang sama digunakan (Gbr. 2). Pada lapisan ketiga, lubang dengan lebar 6 m (sepanjang sumbu X), kedalaman 8 m (sepanjang sumbu Z), dan panjang 40 m (sepanjang sumbu Y) dimasukkan untuk membuat model 2.5D, dengan lubang yang memiliki sifat yang sama dengan LVL. Alih-alih menggunakan pendekatan tradisional teknik akuisisi roll-along, lubang digeser sepanjang sumbu X dari posisi ke-1 hingga ke-15 (lihat Gbr. 2) dengan interval 6 m (dsr: source receiver move), yang secara efektif menghasilkan 15 titik bidikan yang setara dengan teknik akuisisi tradisional.

Untuk simulasi, tiga streamer geofon paralel, dengan jarak 2,5 (dp) meter, masing-masing dilengkapi dengan 100 receiver tetap pada interval 1 m (dx), dan dilengkapi dengan sumber Ricker 10 Hz, digunakan. Namun, selama pemrosesan data, kami menggunakan secara selektif hanya 24 receiver pada interval 2 m (dx) dengan offset bidikan terdekat yang sejajar (off) sebesar 12 m dari setiap streamer, yang menghasilkan Hal ini sesuai dengan skenario survei MASW-DS yang realistis, di mana secara tipikal digunakan dua susunan 24 saluran off-line, dengan jarak 5 (dp) meter (lihat Gbr. 1). Dalam studi ini, profil kecepatan gelombang-S dan penampang semu yang diperoleh dari streamer off-line (pada Y= 17,5 m dan 22,5 m) dibandingkan dengan profil kecepatan gelombang-S yang diperoleh dari array in-line (Y= 20 m).

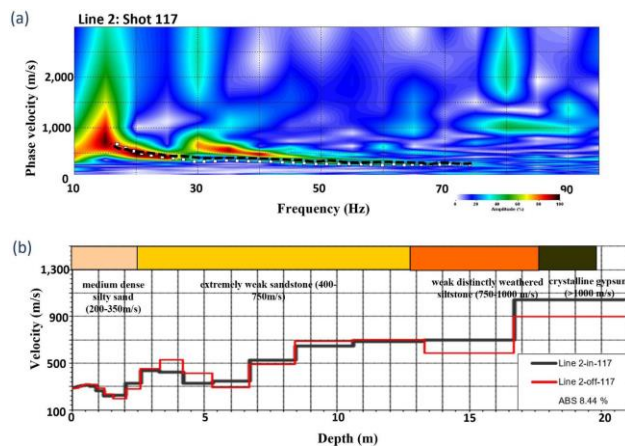
Pemrosesan data MASW sintesis dilakukan dengan menggunakan algoritma kriSIS [9]. Kurva dispersi yang dihasilkan menunjukkan kecepatan fase yang berkisar antara sekitar 205 m/s pada 6,2 Hz hingga 135 m/s pada 25 Hz, sesuai dengan nilai panjang gelombang Rayleigh yang berkisar antara 33 hingga 5,4 m (lihat Gambar 3). Kami menghitung kurva dispersi dari data array penerima

in-line dan off-line pada awalnya menggunakan offset in-line. Hal ini menyebabkan kesalahan pada jarak Pythagoras sumber-geofon yang sebenarnya, yaitu sebesar 0,26 m untuk receiver yang dipilih dan 0,05 m untuk yang terjauh. Untuk evaluasi kesalahan kurva dispersi fundamental dari offline, dibandingkan dengan yang sesuai dengan data in-line, kami menggunakan kesalahan absolut terstandarisasi rata-rata (ABS).



Gambar 2. Penampang semu dari inversi data in-line (a dan c) dan off-line (b dan d) menggunakan model 4-lapisan (a dan b) dan model 15-lapisan (c dan d). Model yang sebenarnya juga disajikan

Teknik Thomson-Haskell [40] digunakan untuk mengevaluasi kurva dispersi fundamental dari model yang diletakkan secara horizontal (tanpa adanya lubang), seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 2. Kesalahan ABS antara kurva dispersi data analitik dan sintetik kurang dari 1,18% ketika sumber terletak sejajar dengan receiver. Kesalahan ini muncul dari (a) kesalahan numerik, yang terlibat dalam pembuatan data sintetik, (b) panjang larik pendek yang digunakan (46 m), dan (c) kesalahan pembulatan yang disebabkan oleh perhitungan domain kecepatan fase-frekuensi. Inversi kurva dispersi fundamental [13] dilakukan dengan menggunakan: (a) model 4 lapisan, menggunakan nilai V_p , ketebalan, dan densitas yang sebenarnya, dan (b) model 15 lapisan dengan ketebalan lapisan yang meningkat pada kedalaman dan rasio Poisson tetap sebesar 0.4. Pengujian kedua (b) dilakukan untuk menguji pengaruh lapisan model yang berubah-ubah terhadap hasil akhir. Perbandingan profil V_s dan kurva dispersi untuk model berlapis horizontal yang berasal dari data streamer off-line ($Y= 17.5$ m) dan in-line ($Y= 20$ m) disajikan. Untuk model yang pertama, kurva dispersi fundamental dan profil kecepatan gelombang-S yang sesuai dievaluasi dengan menggunakan jarak sumber-penerima Pythagoras yang sebenarnya, dan juga offset dari streamer in-line. Kurva dispersi dan model yang sesuai dengan model yang sebenarnya juga ditampilkan. Seperti yang telah diantisipasi, kedua streamer geophone off-line menghasilkan kurva dispersi dan profil kecepatan gelombang-S yang identik, karena simetri model.



Gbr. 3 Kumpulan data 3: Perbandingan kurva dispersi yang dihasilkan dari pemotretan di stasiun 117 pada jalur 2 yang diperoleh dengan menggunakan perataan sumber in-line (kotak putih) dan off-line (garis hitam). Perbedaan ABS adalah 2,07%. **b** Perbandingan profil Vs dari rekaman yang sama menggunakan penyelaras sumber in-line (garis hitam) dan off-line (garis merah). Perbedaan ABS adalah 8,44%. Temuan inti dari lubang bor terdekat ditumpangkan pada Gambar 8b untuk verifikasi geologi dari hasil

4. Diskusi.

Hasil yang diperoleh dari analisis komparatif antara teknik MASW-DS dan metode MASW konvensional memberikan wawasan yang berharga mengenai kemampuan, keterbatasan, dan implikasi yang lebih luas dari pendekatan akuisisi yang inovatif untuk karakterisasi bawah permukaan. Proses validasi teknik MASW-DS dilakukan melalui perbandingan antara dua metode melalui satu set data sintetis dan data riil. Secara keseluruhan, dua model sintetis (lihat Gambar 2 dan 10a) dan empat set data riil digunakan. Pada set data riil, total 240 pemotretan dilakukan dengan menggunakan kedua teknik tersebut, sehingga memungkinkan perbandingan yang komprehensif pada berbagai pengaturan geologi- kal dengan adanya Lapisan Kecepatan Rendah (LVL) pada dua kasus yang diperiksa.

Hasil yang diperoleh dari teknik MASW-DS menunjukkan tingkat kemiripan yang tinggi dalam kurva dispersi jika dibandingkan dengan hasil yang diperoleh melalui metode MASW konvensional. Dari total 240 pemotretan, perbedaan ABS rata-rata untuk kurva dispersi antara kedua teknik ditemukan sebesar 1,92%. Kesalahan yang diharapkan dalam pendekatan yang kami usulkan, yang timbul dari jarak Pythagoras sumber-geofon yang sebenarnya karena posisi sumber yang tidak sejajar, memiliki dampak yang dapat diabaikan pada kurva dispersi yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan konsistensi yang kuat pada data gelombang permukaan yang diperoleh melalui kedua pendekatan tersebut, yang menegaskan keandalan dan keefektifan teknik MASW-DS dalam menangkap karakteristik bawah permukaan.

Namun demikian, setelah dianalisis lebih lanjut, teramati bahwa perbedaan rata-rata ABS dalam profil Vs terbalik yang berasal dari teknik MASW-DS adalah sekitar 15,7% pada seluruh 240 bidikan. Meskipun perbedaan ini mungkin tampak signifikan, namun sangat penting

menjelaskan bahwa perbedaan ini terutama berasal dari perbedaan nilai Vs lokal (outlier), daripada variasi keseluruhan yang signifikan pada penampang semu Vs. Hal ini berarti bahwa struktur kecepatan seismik yang dihasilkan dari MASW-DS secara umum sesuai dengan struktur yang sesuai dengan MASW konvensional, dengan beberapa pengecualian lokal, di mana terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai Vs. Selain itu, perbedaan yang teramati pada profil Vs juga dapat dikaitkan dengan kecenderungan yang melekat pada proses inversi untuk memperbesar variasi kecepatan yang tajam untuk mendapatkan kecocokan yang terbaik, terutama ketika kesalahan yang terjadi pada pelapisan awal atau adanya LVL pada model. Dengan demikian, perbedaan dalam profil Vs tidak terutama disebabkan oleh variasi dalam kurva dispersi yang diperoleh melalui teknik MASW-DS, tetapi lebih disebabkan oleh kerumitan (seperti linearisasi dari proses non- linear dan keunikan model akhir) yang terlibat dalam proses inversi. Yaitu, perbedaan yang relatif rendah pada data asli (kurva dispersi) dibesar-besarkan oleh proses inversi, yang menghasilkan perbedaan lokal yang relatif tinggi pada profil Vs. Secara keseluruhan, meskipun terdapat perbedaan ABS yang relatif lebih tinggi yang diamati pada profil Vs terbalik, tidak ada perubahan signifikan yang dicatat dalam interpretasi geologis akhir mereka. Sebuah kesepakatan substansial diamati antara penampang semu 2D akhir yang dihasilkan oleh kedua metodologi, yang menunjukkan korelasi yang kuat dengan lubang bor validasi. Lapisan seismik utama yang diidentifikasi dengan menggunakan metode MASW konvensional juga dapat dilihat pada hasil MASW-DS, yang menunjukkan geometri model kecepatan yang sebanding. Perbedaan utama yang diamati pada profil Vs terbalik, dan akibatnya pada penampang semu 2D, terutama disebabkan oleh variasi lokal pada kecepatan gelombang-S. Secara umum, pendekatan MASW-DS berhasil menghasilkan model seismik yang serupa bahkan dalam kondisi geologi yang kompleks, seperti pada set data 4 dari Pulau Yas, Abu Dhabi, UEA, di mana LVL terdeteksi (lihat lempung berpasir yang sangat lunak pada Gbr. 2a dan b) atau pada set data 5 dari Pulau Jubail, Abu Dhabi, UEA, di mana variasi Vs lateral yang kuat teramati (lihat bagian 20-45 m pada Gbr. 3a dan b).

Secara keseluruhan, meskipun perbedaan ABS yang relatif lebih tinggi yang relatif lebih tinggi yang diamati pada model gelombang-S terbalik, teknik MASW-DS telah terbukti sangat konsisten dalam menghasilkan kurva dispersi yang sebanding dengan kurva yang diperoleh melalui metode MASW konvensional. Hal ini menggarisbawahi ketangguhan dan kemampuan penerapan teknik MASW-DS untuk karakterisasi bawah permukaan dan investigasi geologi. Keberhasilan teknik MASW-DS yang telah ditunjukkan dalam berbagai kondisi geologi menunjukkan potensinya untuk diterapkan secara luas di luar lokasi spesifik yang diuji dalam penelitian ini. Selain itu, implementasi teknik MASW-DS

yang mudah, ditambah dengan kemampuannya untuk menawarkan data bawah permukaan yang komprehensif dengan harga yang terjangkau dan efisien, membuatnya menarik untuk diadopsi di berbagai kondisi geologi, asalkan kondisi lokasi memungkinkan.

5. Kesimpulan

Kesimpulan merupakan jawaban atas rumusan masalah yang diberikan pada Pendahuluan/Latar Belakang. Sebagai kesimpulan, perbandingan antara teknik MASW-DS dan metode MASW konvensional telah memberikan wawasan yang berharga mengenai kemampuan, keterbatasan, dan implikasi yang lebih luas dari pendekatan inovatif untuk karakterisasi bawah permukaan. Melalui pemeriksaan sistematis dengan menggunakan set data sintesis dan data riil, kami menunjukkan bahwa teknik MASW-DS menghasilkan kurva dispersi yang sangat mirip dengan MASW konvensional, dengan perbedaan ABS rata-rata sebesar 1,92% pada 240 bidikan. Lebih jauh lagi, penelitian ini menunjukkan bahwa menggunakan offset inline - bukan offset geometris yang sebenarnya - hanya menimbulkan kesalahan kecil pada kurva dispersi. Temuan ini menunjukkan bahwa data MASW-DS dapat diproses secara efektif dengan menggunakan perangkat lunak MASW konvensional, asalkan perangkat lunak tidak mengasumsikan jarak penerima yang tidak teratur. Meskipun perbedaan rata-rata pada model gelombang-S terbalik relatif tinggi (15,7%), tidak ada variasi yang signifikan dalam interpretasi geologi akhir. Metode MASW-DS berhasil menghasilkan model kecepatan gelombang-S yang serupa, yang menunjukkan geometri yang dapat dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh MASW konvensional. Hasilnya, teknik akuisisi MASW-DS bekerja dengan baik, bahkan di dalam kondisi geologi yang kompleks, di mana LVL yang terlokalisasi terdeteksi. Meskipun ada kesalahan yang diantisipasi, terkait dengan konfigurasi sumber off-line, dampak pada kurva dispersi dapat diabaikan dibandingkan dengan teknik MASW konvensional.

Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun mungkin ada perbedaan perbedaan dalam profil kecepatan antara MASW-DS dan MASW konvensional, perbedaan ini tidak secara signifikan mempengaruhi interpretasi struktur bawah permukaan secara keseluruhan. Oleh karena itu, MASW-DS dapat dianggap sebagai teknik yang handal dan tangguh untuk karakterisasi bawah permukaan, yang menawarkan keuntungan penghematan waktu yang signifikan. Hal ini dapat mengurangi biaya survei MASW geofisika tertentu hingga hampir setengahnya, tanpa mengorbankan kualitas data. Selain itu, MASW-DS berhasil mereproduksi profil Vs yang dihasilkan dari penggunaan MASW konvensional dalam batas kesalahan yang dapat diterima, sehingga menjadi pilihan yang layak bagi para insinyur.

Upaya penelitian di masa depan dapat berfokus pada validasi teknik MASW-DS lebih lanjut, di berbagai pengaturan geologi yang lebih luas dan menyempurnakan parameter- parameternya untuk mengoptimalkan kinerja dalam skenario tertentu. Selain itu, mengeksplorasi potensi untuk menarik lebih dari dua land streamer secara bersamaan dapat memberikan dampak yang signifikan

dalam hal pengurangan waktu dan biaya. Dengan terus mengeksplorasi potensi aplikasinya dan menyempurnakan metodologinya, teknik MASW-DS memiliki potensi untuk muncul sebagai alat yang berharga dalam investigasi geoteknik, proyek-proyek teknik sipil, dan penilaian lingkungan di seluruh dunia. Hal yang paling penting adalah pengurangan yang signifikan dalam waktu akuisisi data dan biaya yang terkait, sehingga membuatnya sangat menarik untuk proyek-proyek berskala besar yang membutuhkan efisiensi.

Selain konstruksi skala besar dan investigasi geo-teknis di wilayah GCC, teknik MASW-DS menjanjikan aplikasi yang lebih luas dalam berbagai konteks geografis dan geologis. Pengaturan akuisisi data yang efisien waktu dapat bermanfaat di lingkungan perkotaan dengan sedimen lunak, permafrost atau kondisi tanah beku di mana akses cepat sangat penting, dan medan yang terpencil atau sulit secara logistik di mana meminimalkan waktu penyebaran di lapangan sangat penting. Persyaratan utama tetaplah ketersediaan permukaan yang cukup datar dan bebas rintangan yang memungkinkan penarik streamer darat ganda dengan lancar, sehingga menjadikan MASW-DS alat yang berpotensi serbaguna di berbagai aplikasi geofisika dekat permukaan.

6. Daftar Pustaka

- [1] K. Mostafa, S. Ojulari, and T. Hegazy, "Enhanced repetitive scheduling formulation for meeting deadlines and resource constraints in linear and scattered projects," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 50, no. 3, pp. 172–183, 2023, doi: 10.1139/cjce-2022-0029.
- [2] A. N. El-Attar and A. A. El-Latif, "Effect of Glass Fiber Reinforcement on Bearing Capacity and Settlement of Foundations on Soft Clay," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 42, no. 7, pp. 6435–6456, 2024, doi: 10.1007/s10706-024-02867-5.
- [3] N. R. Taher, M. Gör, H. S. Aksoy, and H. A. Awlla, "Numerical investigation of the effect of slope angle and height on the stability of a slope composed of sandy soil," *Gumushane Universitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 2, pp. 664–675, 2022, doi: 10.17714/gumusfenbil.1051741.
- [4] G. J. de Dieu, W. Huang, S. Bin, and N. Mathieu, "Comparison of supervised ML algorithms for road traffic crash prediction models in Rwanda," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, vol. 178, no. 2, pp. 83–98, 2025, doi: 10.1680/jtran.23.00078.
- [5] F. P. Eka Putra, Moh. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *Jurnal Informasi dan Teknologi*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [6] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *Jurnal Ilmiah ILKOMINFO - Ilmu Komputer & Informatika*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [7] F. P. E. Putra, M. Aziz, G. Arifin, A. Rohman, A. Rizki, and A. M. Syam, "Analisis Qos & Qoe," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 5, no. 1, pp. 140–145, 2024, doi: 10.46799/jsa.v5i1.973.
- [8] Y. Zhou, Y. Liu, Y. Lian, T. Pan, Y. Zheng, and Y. Zhou, "Ambient vibration measurement-aided multi-1D CNNs

- ensemble for damage localization framework: demonstration on a large-scale RC pedestrian bridge,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 224, 2025, doi: 10.1016/j.ymssp.2024.111937.
- [9] A. A. Tangga, H. A. L. Mufargi, A. Milad, A. A. Ali, A. M. Al-Sabaei, and N. I. Md Yusoff, “Utilising machine learning algorithms to predict the Marshall characteristics of asphalt pavement layers,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 9, no. 10, 2024, doi: 10.1007/s41062-024-01698-w.
- [10] F. S. Hassan and M. Q. Ismael, “Enhancement of the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures Modified by Nano Clay and Crumb Rubber,” *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 14, no. 5, pp. 17438–17444, 2024, doi: 10.48084/etasr.8531.
- [11] A. Qabur, H. Baaj, and M. El-Hakim, “A Laboratory Study on Enhancing Asphalt Mixture Properties through Dry Mixing with High-Dose Multilayer Plastic Packaging Pellet Additives,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 37, no. 4, 2025, doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-19101.
- [12] Ö. Kaya and M. Y. Çodur, “Automatic detection and classification of road defects on a global-scale: Embedded system,” *Measurement (Lond)*, vol. 243, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2024.116453.
- [13] P. Chen, K. Chatti, and B. Cetin, “Accuracy of Pavement ME Methodology in Predicting Strain Responses under Multiple Axle Loadings in Flexible Pavements,” *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, vol. 151, no. 1, 2025, doi: 10.1061/JPEODX.PVENG-1632.
- [14] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Hamzah, W. A. Pramadi, and A. Nuraini, “Systematic Literature Review: Security Gap Detection On Websites Using Owasp Zap,” *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 348–355, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4227.
- [15] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, “Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik,” *Digital Transformation Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 931–937, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [16] F. P. E. Putra, A. B. Tamam, R. W. Efendi, and Z. Muim, “Optimasi Keamanan DNS_ Eksplorasi Optimal dengan Implementasi DNS Security Extensions (DNSSEC),” *Riset dan E-Jurnal Manajemen Informatika Komputer*, vol. 8, no. 1, pp. 349–358, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.polgan.ac.id/index.php/remik/article/view/13398%0Ahttps://jurnal.polgan.ac.id/index.php/remik/article/download/13398/2325>
- [17] R. Yang, G. Shi, C. Zhang, G. Li, and X. Cai, “Internal Energy Based Grid-Forming Control for MMC-HVDC Systems With Wind Farm Integration,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 1, pp. 503–512, 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3205569.
- [18] M. M. Elwakil, H. M. E. Zoghaby, S. M. Sharaf, and M. A. Mosa, “Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for Islanded microgrid stability improvement,” *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 8, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s41601-023-00333-7.
- [19] N. Mohammed, H. Udawatte, W. Zhou, D. J. Hill, and B. Bahrani, “Grid-Forming Inverters: A Comparative Study of Different Control Strategies in Frequency and Time Domains,” *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 5, pp. 185–214, 2024, doi: 10.1109/OJIES.2024.3371985.
- [20] C. Yin and S. Mao, “Fractional multivariate grey Bernoulli model combined with improved grey wolf algorithm: Application in short-term power load forecasting,” *Energy*, vol. 269, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126844.
- [21] S. Wu, H. Li, Y. Liu, Y. Lu, Z. Wang, and Y. Liu, “A two-stage rolling optimization strategy for park-level integrated energy system considering multi-energy flexibility,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 145, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108600.
- [22] P. Zhao *et al.*, “Distributed Power Sharing Control Based on Adaptive Virtual Impedance in Seaport Microgrids with Cold Ironing,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 2, pp. 2472–2485, 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3211204.
- [23] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., “Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus,” *Digital Transformation ...*, vol. 3, no. 2, pp. 996–1001, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.itscience.org/index.php/digitech/article/view/3457>
- [24] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. B. Tamam, and R. W. Efendi, “Implementation And Simulation Of Dynamic Arp Inspection In Cisco Packet Tracer For Network Security,” *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 340–347, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4199.
- [25] H. Song, J. Lao, L. Zhang, C. Xie, and Y. Wang, “Underground hydrogen storage in reservoirs: pore-scale mechanisms and optimization of storage capacity and efficiency,” *Appl Energy*, vol. 337, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120901.
- [26] S. Sahoo and P. Timmann, “Energy Storage Technologies for Modern Power Systems: A Detailed Analysis of Functionalities, Potentials, and Impacts,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49689–49729, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274504.
- [27] C. W. Zhang, “The active rotary inertia driver system for flutter vibration control of bridges and various promising applications,” *Sci China Technol Sci*, vol. 66, no. 2, pp. 390–405, 2023, doi: 10.1007/s11431-022-2228-0.
- [28] Z. Wang, X. Liu, Y. Huang, P. Zhang, and Y. Fu, “A multivariate time series graph neural network for district heat load forecasting,” *Energy*, vol. 278, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127911.
- [29] S. Chen, Y. Sun, H. Han, G. Shi, Y. Guan, and J. M. Guerrero, “Dynamic Frequency Performance Analysis and Improvement for Parallel VSG Systems Considering Virtual Inertia and Damping Coefficient,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 11, no. 1, pp. 478–489, 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3208249.
- [30] A. E. Leon and J. M. Mauricio, “Virtual Synchronous Generator for VSC-HVDC Stations With DC Voltage Control,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 728–738, 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3164027.
- [31] J. Price, I. Keppo, and P. E. Dodds, “The role of new nuclear power in the UK’s net-zero emissions energy system,” *Energy*, vol. 262, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125450.
- [32] S. Sundarraj, R. V. K. Reddy, M. B. Basam, G. H. Lokes, F. Flammini, and R. Natarajan, “Route Planning for an Autonomous Robotic Vehicle Employing a Weight-Controlled Particle Swarm-Optimized Dijkstra Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 92433–92442, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3302698.

- [33] Y. Li, M. Han, M. Shahidehpour, J. Li, and C. Long, "Data-driven distributionally robust scheduling of community integrated energy systems with uncertain renewable generations considering integrated demand response," *Appl Energy*, vol. 335, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120749.
- [34] S. Rivera *et al.*, "Charging Infrastructure and Grid Integration for Electromobility," *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 4, pp. 371–396, 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3216362.
- [35] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Zulfikri, G. Arifin, and R. M. Ilhamsyah, "Analysis of Phishing Attack Trends, Impacts and Prevention Methods: Literature Study," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 413–421, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4357.
- [36] S. Jakeer, S. R. R. Reddy, A. M. Rashad, M. Lakshmi Rupa, and C. Manjula, "Nonlinear analysis of Darcy-Forchheimer flow in EMHD ternary hybrid nanofluid (Cu-CNT-Ti/water) with radiation effect," *Forces in Mechanics*, vol. 10, 2023, doi: 10.1016/j.finmec.2023.100177.
- [37] M. Awais, T. Salahuddin, and S. Muhammad, "Effects of viscous dissipation and activation energy for the MHD Eyring-powell fluid flow with Darcy-Forchheimer and variable fluid properties," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102422.
- [38] K. Tang, J. Qiu, J. Lai, F. Xue, Z. Wang, and X. Li, "Experimental investigation on deformation-failure mechanisms of a shallow-bias large-section loess tunnel induced by rainfall," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 157, 2025, doi: 10.1016/j.tust.2024.106253.
- [39] Hamkah, H. Halim, D. Mairuhu, Hasriana, Aisyah, and Z. Saing, "Effect of the Portland Composite Cement Addition on the Marshall Characteristics of the Cold Paving Hot Mix Asbuton," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, no. 3, pp. 1611–1620, 2024, doi: 10.13189/cea.2024.120326.
- [40] J. J. García Mainieri and I. L. Al-Qadi, "Designing Stone-Matrix Asphalt to Optimize Sustainability Using Limestone, Dolomite, and Crushed Gravel Aggregates," *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, vol. 151, no. 1, 2025, doi: 10.1061/JPEODX.PVENG-1614.