



## Experimental study of the effect of holes number and arrangement of lattice poulder on offshore dynamic compaction

M.H. Taghizadeh Valdi<sup>1</sup>, M.R. Atrechian<sup>\*2</sup>, A. Jafary Shalkoohy<sup>3</sup>, S.A. Hosseini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Bandar Anzali Branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran

**ABSTRACT:** In offshore dynamic compaction, the water effect on the deterioration of the poulder impact velocity on seabed and the crater depth formed in the soil is always a major challenge. In this paper, the water entry problem of lattice pounders of 9, 16, and 25 holes, with 3x3, 4x4, and 5x5 matrix arrangements respectively, the effect of the number, dimensions and arrangement of the poulder holes, on the impact velocity with simulated soil of the seabed and the crater depth formed in it was studied experimentally. The results showed that the impact velocity of the lattice pounders depends on the holes area, and the crater depth formed in the soil, the amount of energy transferred from the poulder to the soil and the improvement radius and depth of soil depend on the area of the poulder's lattice web. Therefore, in dynamic compaction of the seabed, increasing the poulder weight without reticulating it cannot be considered as a suitable solution to increase the impact velocity on seabed and the effective factor on soil settlement and compaction. Also increasing the poulder weight and its drop height over the optimum drop height lead to increasing the operating costs, and it requires the use of large barges and long cranes with a high load capacity.

### Review History:

Received: 2019-01-30

Revised: 2019-03-10

Accepted: 2019-06-01

Available Online: 2019-06-17

### Keywords:

Offshore dynamic compaction

Lattice poulder

Velocity deterioration

Holes arrangement

Crater depth.

## 1. INTRODUCTION

The first application of soil improvement on the seabed goes back to the 1970. Louis Menard carried out the first offshore dynamic compaction project in 1973 as part of the construction of Brest naval Port's prefabricated dry dock in France [1]. In this project a specially designed 11 ton poulder was used to compact about 3 m of loose alluvium seabed over an area of 4,500 m<sup>2</sup> [25-]. In 1975, offshore dynamic compaction was used at Pointe Noire in Gabon to improve the passive resistance of loose sand in front of a cellular sheet piled wall. The specially designed poulder used in this project weighed 12 tons. Prior to ground improvement a 0.4 m thick blanket of gravelly sand was placed over the seabed, located 13.5 m below sea level. Generally, in this 14,000 m<sup>2</sup> project two phases of dynamic compaction with compaction energy intensity of 240 tm/m<sup>2</sup> were applied to provide an allowable bearing capacity of 400 kPa. In 1975, at Udevalla, Sweden, offshore dynamic was applied for the treatment of a granite rock fill that was placed below the prefabricated caissons. The rock size was up to 1 m in diameter, the top of the fill was 12 m below sea level, and its thickness was variable from 17 to 20 m. Due to the size of the rock fill, dynamic compaction was performed by using a 40 ton poulder that was dropped from 40 m using the Menard's Mega Machine [6]. In 1977, a 32 tons poulder was used to compact a 5 m thick layer of silty sand and a 1.5 to 2 m thick rock fill blanket at the depth of 10 m

\*Corresponding author's email: atrechian@iauz.ac.ir

below seawater level to mitigate the risk of liquefaction of a breakwater foundation at Kuwait Naval Base. Marine ground improvement was carried out over an area of approximately 36,000 m<sup>2</sup> [5,7]. In 1977, offshore dynamic compaction was applied for the treatment of seabed at Sfax Fishing Quay in Tunisia. In this project water depth was 1 m, and the seabed was composed of 5 m of very soft clay followed by 2 m of silty sand and 3 m of denser clayey sand, and firm clay. Dynamic compaction was performed using a 17 ton poulder with a square grid spacing of 2 m. Compaction was carried out in 3 to 5 phases with 2 to 10 blows per print [5,8]. In 1979, dynamic compaction was carried over an area of 13800 m<sup>2</sup> prior to placement of the prefabricated sections of a dry dock in Lagos Pier in Nigeria. Initially, the seabed was excavated to -15 m RL (reduced level), and backfilled with 1 m of rock fill. Soil improvement was carried out using a 40 ton poulder with the intention of treating 15 m of soil. Up to 5 passes of dynamic compaction were applied in some locations [5]. In 1980, a desalination plant was assembled in Japan, towed to Yanbu in Saudi Arabia, and sunk on a seabed foundation prepared by dynamic compaction. The seabed was composed of 8 m of loose silty sand, with the upper 4 m being very heterogeneous. Hence, the top 4 m of seabed was removed, and replaced by crushed coral, and dynamic compaction was applied using a 17 ton poulder that was dropped on a square grid with 8 m spacing. The number of blows per print in the compaction phases varied from 12 to 10. In 2010, dynamic compaction



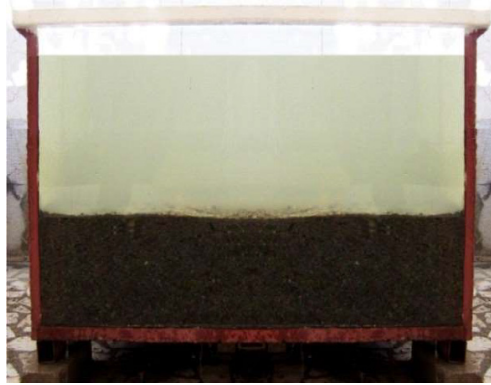


Fig 1. Saturated soil and water height above it

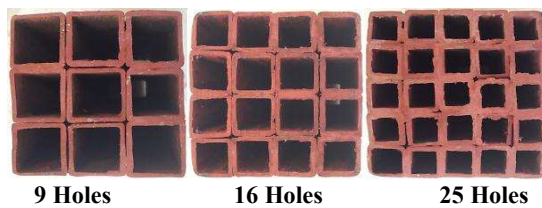


Fig 2. Lattice pouncers with matrix arrangement

was used to improve the seabed soil in Southeast Asia. A lattice pouncer with a base size of 1.7x1.7 m and weighing 38.5 tons was fabricated. The special shape of this pouncer allowed minimum water resistance during the pouncer's drop and penetration in the seawater. The drop height during the trial was set to 5 m above seabed level. Records of the crane's winch speed during the works indicate that the maximum drop speeds were in the range of 430 m/min. This speed is equivalent to a free fall with a drop height of 2.6 m (in air) and verifies the original assumption that much of the drops' kinematic energies would have been lost to water resistance. In the implemented researches, in order to reduce the effect of water on the depreciation of pouncer collision velocity with the seabed, the lattice pouncer have been used, but the number and dimensions of holes and their area, which must be proportional to the size and area of pouncer and its lattice web, are less studied. In this paper, the arrival of lattice pouncers with 9, 16 and 25 holes with a matrix arrangement 3x3, 4x4 and 5x5 in water and the effect of the number, dimensions and arrangement of the pouncer holes on the collision velocity with of the seabed simulated soil and the depth of the created hole in it are studied experimentally.

## 2. MATERIALS AND METHODS

As shown in Fig 1, a cube-shaped test tank with dimensions of 100x100x80 cm is designed so that the effect of the walls on results is negligible. The side walls and floor of the tank are made of a 2 mm double-side welded steel plate and the forehead is made of 10 mm glass. In order to ensure that there is no leakage of water outside the tank, the welding spots of the steel plates and the bonding of the glass is adequately covered with sealing glue, and on the left side of the tank, there is a valve for emptying the water inside the tank when necessary. In order to absorb the waves due to the collision of pouncer with the soil surface by tank walls, and its failure to return it to the computational domain after collision with side boundaries, the tank walls are covered with polystyrene sheets with thickness of 2 cm. Then the appropriate amount of poor-grained silty sand prepared from the Caspian seabed in Anzali port in north of Iran, so that its specifications are shown in Table 1. The soil test is poured in the test tank and will be compacted until it reaches a thickness of 30 cm and the density 40%. Because the seabed due to sedimentation and consolidation of sediments by waves and long-term loading caused by the weight of the water on it has relative density. Then the test tank will be slowly filled with water up to 40 cm above the soil surface, so that the initial soil density does not change. After that, the lattice pouncers are released from a height of 1 m above the free water surface and their movement in the water depth from the instant of contact with the free water surface until the moment of contact with the soil surface is recorded by the high-speed camera. After the collision of pouncer with the soil surface, the crater depth formed after each impact is measured.

In Fig 2, the geometric shape of the pouncers is shown. As can be seen, three types of lattice pouncers with variable number of holes including 9, 16 and 25 holes are arranged in a matrix arrangement of, 3x3, 4x4 and 5x5 respectively for dynamic compaction of simulated soil from seabed in a laboratory environment. Pouncer's weight is considered to be 3.85 kg. The experimental observations include the pouncer's movement in water depth and the collision with the soil surface of the model bed, which creates a crater in it. The pouncer's release position is adjusted so that it impacts the soil in a specific point after each release. After each impact, the amount of penetration of the pouncer in the soil, and in other word the crater depth is measured and recorded. The dynamic compaction operation continues until the pouncer penetration in the soil stops, and after the crater depth did not change significantly due to the collision, the amount of soil settlement in that area is measured. Then, the effect of repeated pouncer blows on the compaction of the colored layers of the soil and the reduction of the thickness of each layer is investigated then the depth of soil improvement is determined by the impact of the blows. The geometric characteristics of the lattice pouncers are in Table 2.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

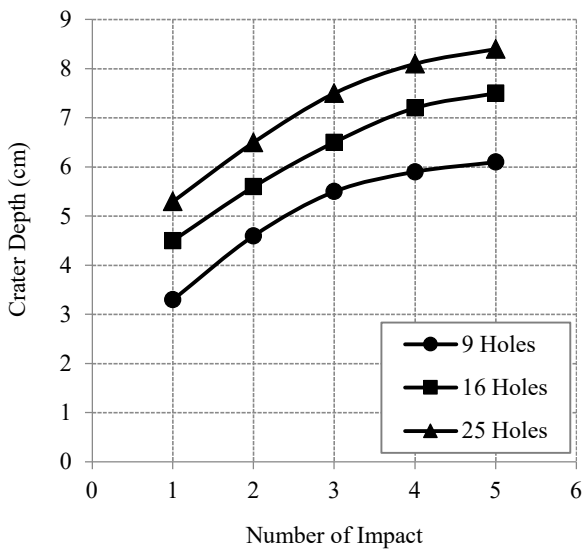
Fig 3 shows the effect of holes number and arrangement of the lattice pouncers on crater depth after each impact. As can be seen, the 25 holes lattice pouncer which has a more web area than other lattice pouncers, lead to create a highest crater depth in the soil depth after each impact. In contrast,

**Table 1. Geotechnical properties of Anzali sand**

$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$\gamma_{d_{min}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{d_{max}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$C_c$	$C_u$	$D_{max}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	USCS
2.67	0.71	0.57	15.6	16.9	1.2	2.4	1.18	0.21	SP-SM

**Table 2. Geometric properties of lattice pounders**

Number of holes	Holes arrangement	Pounder dimensions (cm)	Hole dimensions (cm)	Wall thickness (cm)	Holes spacing (cm)	Holes area (cm <sup>2</sup> )	Lattice web area (cm <sup>2</sup> )	Wall area of holes (cm <sup>2</sup> )	Moment of inertia (cm <sup>4</sup> )
9	3x3	10x10x22.5	2.83	0.25	0.5	75.25	24.75	2295	19
16	4x4	10x10x16.5	2	0.25	0.5	64	36	2112	24
25	5x5	10x10x14.5	1.5	0.25	0.5	56.25	43.75	2175	29.16



**Fig 3. The effect of holes number and arrangement of the lattice pounders on crater depth after each impact**

the 9 holes lattice poulder which has minimum web area creates a lowest crater depth in the soil after each impact. Therefore, it can be concluded that the impact velocity of the lattice pounders depends on their holes area, and the crater depth formed in the soil, amount of energy transferred from poulder to the soil and its improvement radius and depth depends on the web area of lattice pounders. Hence, with increasing the poulder’s holes area, the poulder’s velocity depreciation will decrease while moving in the water depth and as a result, the poulder impacts the seabed with high velocity. On the other hand, increasing the web area of lattice pounders leads to transferring the more energy from poulder to the soil and increasing its improvement radius and depth. As a result, the amount of poulder penetration in the soil will be increased and creates a deeper cavity. Therefore, in

designing the lattice pounders for the dynamic compaction of the seabed, the number, dimensions and area of holes in lattice pounders should be proportionate with their dimensions and lattice web area. So that in addition to having the least velocity depreciation while moving in the water depth and reaching the highest velocity at the moment of collision with the seabed, and lead to a maximum improvement radius and depth of soil.

**4. CONCLUSIONS**

In this paper, the water entry problem of lattice pounders with 9, 16 and 25 holes and matrix arrangement of 3x3, 4x4 and 5x5 respectively was simulated experimentally, and the effect of the number, dimensions and arrangement of the poulder holes on the impact velocity with seabed and also the crater depth formed in soil were studied. The results showed that impact velocity of the lattice pounders depends on the area of the holes, and crater depth formed in the soil, amount of energy transferred from the poulder to the soil and also its improvement radius and depth depend on the web area of the lattice pounders. Hence, the larger the pounder’s velocity decreases while moving in the depths of the water, and the poulder will impact the surface of the seabed faster, And the larger the web area of the lattice pounders would be, the penetration amount in the soil is greater and the cavity is deeper.

**5. REFERENCES**

[1] Hamidi B. 2014. Distinguished ground improvement projects by dynamic compaction or dynamic replacement. Ph.D. Thesis, Curtin University, Perth, Australia.  
 [2] Boulard J. 1974. La forme de radoub prefabriquee No. 10 Du Port Militaire De Brest. Travaux, Oct 17-29.  
 [3] Menard L. 1974. Fondation d’une cale de radoub a brest. 6th International Harbour Conference, Antwerp, Belgium, May 12-18, pp: 1-15.

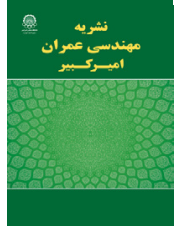
- [4] Renault J, Tourneur P. 1974. La forme de radoub No. 10 à Brest. 6th International Harbor Conference, Antwerp, Belgium.
- [5] Gambin MP. 1982. Menard dynamic compaction, a new method for improving foundation beds off-shore. International Symposium, Brugge, Belgium, May 5-7, pp: 3.91-93.95.
- [6] Menard L. 1978. La consolidation dynamique comme solution aux problemes de fondation: pour la construction de quais, terminaux, reservoirs de stockage etiles artificielles sur sols compressibles. 7th International Harbour Conference, Antwerp, Belgium.
- [7] Chu J, Varaksin S, Klotz U, Mengé P. 2009. State of the art report: construction processes. 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering: TC17 meeting ground improvement, Alexandria, Egypt, Oct 7, pp: 130.
- [8] Menard L. 1981. L'utilisation de la consolidation dynamique pour la réalisation du nouveau port de pêche de sfax en tunisie. Navires, Ports et Chantiers.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*M.H. Taghizadeh Valdi, M.R. Atrechian, A. Jafary Shalkoohy, S.A. Hosseini, Experimental study of the effect of holes number and arrangement of lattice pounder on offshore dynamic compaction, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 469-472.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15732.6014](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15732.6014)





## مطالعه آزمایشگاهی تاثیر تعداد و آرایش سوراخ های کوبه مشبک بر تراکم دینامیکی فراساحلی

محمد حسین تقی زاده ولدی<sup>۱</sup>، محمد رضا عطرچیان<sup>۲\*</sup>، عطا جعفری شالکوهی<sup>۳</sup>، سید احمد حسینی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندر انزلی، بندر انزلی، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۱۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۱۹

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

### کلمات کلیدی:

تراکم دینامیکی فراساحلی

کوبه مشبک

استهلاک سرعت

آرایش سوراخ ها

عمق حفره

**خلاصه:** در تراکم دینامیکی فراساحلی، به منظور کاهش اثر آب بر استهلاک سرعت برخورد کوبه با بستر دریا از کوبه های مشبک استفاده می گردد. لذا در طراحی این کوبه های فراساحلی، تعداد و ابعاد سوراخ ها و مساحت آنها باید متناسب با ابعاد و مساحت کوبه و جان مشبک آن باشد. به طوری که علاوه بر برخورداری از کمترین استهلاک سرعت در هنگام حرکت در عمق آب و دستیابی به بیشترین سرعت در لحظه برخورد با بستر دریا، نفوذ قابل قبولی به خاک داشته و با ایجاد عمق حفره مناسب در آن، منجر به حداکثر شعاع و عمق بهبود خاک بستر دریا گردد. در این مقاله ورود کوبه های مشبک ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و آرایش سوراخ های کوبه، بر سرعت برخورد با خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و عمق حفره ایجاد شده در آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت برخورد کوبه های مشبک وابسته به مساحت سوراخ های آن و عمق حفره ایجاد شده در خاک، میزان انرژی انتقال یافته از کوبه به خاک و شعاع و عمق بهبود آن وابسته به مساحت جان مشبک کوبه می باشد. لذا در تراکم دینامیکی بستر دریا، افزایش جرم کوبه بدون مشبک نمودن آن نمی تواند راهکار مناسبی جهت افزایش سرعت برخورد کوبه با بستر دریا و عامل تاثیرگذاری در نشست و تراکم خاک محسوب شود. همچنین افزایش جرم کوبه و ارتفاع سقوط آن بیش از ارتفاع بهینه سقوط علاوه بر افزایش هزینه های اجرایی، مستلزم استفاده از شناور های بزرگ و جرقیل های طولیل و با ظرفیت باربری زیاد است.

### ۱- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفت [۲-۵]. در سال ۱۹۷۵ در پوینت نویر<sup>۲</sup> در کشور گابن، تراکم دینامیکی به منظور بهبود مقاومت غیر فعال ماسه سست بستر دریا، مورد استفاده قرار گرفت. وزن کوبه مخصوص طراحی شده برای این پروژه ۱۲ تن بود. قبل از بهسازی زمین یک لایه به ضخامت ۰/۴ متر از ماسه حاوی سنگریزه بر روی بستر دریا و در عمق ۱۳/۵ متری از سطح آب ریخته شد. به طور کلی تراکم دینامیکی این پروژه ۱۴۰۰۰ متر مربعی در دو فاز با شدت  $tm/m^2$  ۴۰۰ به منظور دستیابی به ظرفیت باربری مجاز ۴۰۰ کیلوپاسکال

اولین کاربرد بهسازی خاک در بستر دریا به سال ۱۹۷۰ بر می گردد. لوئی منارد اولین پروژه تراکم دینامیکی بستر دریا را در سال ۱۹۷۳ به عنوان بخشی از احداث پایگاه نظامی بریست<sup>۱</sup> در فرانسه پیش از ساخت اسکله آن انجام داد [۱]. در این پروژه یک کوبه ۱۱ تنی به طور ویژه طراحی شد که به منظور تراکم ۳ متر از آبرفت سست بستر دریا در منطقه ای به مساحت ۴۵۰۰ متر مربع

1 . Brest

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: atrechian@iauz.ac.ir

2 . Pointe Noire



انجام شد [۶]. در سال ۱۹۷۵ در پروژه آدوالا<sup>۱</sup> در کشور سوئد به مساحت ۵۰۰۰۰ متر مربع از تراکم دینامیکی بستر دریا به منظور بهسازی یک لایه موج شکن که در بستر دریا و در زیر محفظه پیش ساخته قرار دارد استفاده گردید. با توجه به اندازه سنگ های ریخته شده، تراکم دینامیکی با استفاده از کوبه های ۴۰ تنی انجام شد که از ارتفاع ۴۰ متری توسط ابرماشین های منارد رها می شدند [۶]. در سال ۱۹۷۷ از یک کوبه ۳۲ تنی به منظور تراکم لایه ای از ماسه لای دار به ضخامت ۵ متر و یک لایه رویه از خاکریز سنگی به ضخامت ۱/۵ تا ۲ متر که در عمق ۱۰ متری زیر سطح آب دریا قرار داشت استفاده گردید که در این لایه رویه، خاکریز سنگی به منظور کاهش خطر روانگرایی فونداسیون موج شکن در پایگاه دریایی کویت تعبیه شده بود. بهسازی بستر دریا در منطقه ای به وسعت تقریبی ۳۶۰۰۰ مترمربع انجام شد [۵ - ۷]. در سال ۱۹۷۷، تراکم دینامیکی جهت بهسازی بستر دریا در محل اسکله صید ماهی اس فکس<sup>۲</sup> در کشور تونس انجام شد. در این پروژه عمق آب در حدود یک متر و بستر دریا از یک لایه رس بسیار نرم به ضخامت ۵ متر تشکیل شده بود. پس از آن ماسه لای دار به ضخامت ۲ متر و ماسه رسی متراکم به ضخامت ۳ متر و رس سفت قرار داشت. تراکم دینامیکی با سقوط یک کوبه ۱۷ تنی به صورت یک مربع شبکه بندی شده به فاصله ۲ متر انجام شد. عملیات تراکم در ۳ تا ۵ فاز و با ۲ تا ۱۰ ضربه در هر نوبت صورت گرفت [۵ و ۸]. در سال ۱۹۷۹، تراکم دینامیکی در منطقه ای به وسعت ۱۳۸۰۰ متر مربع قبل از قرار دادن قسمت های پیش ساخته در اسکله لاگوس<sup>۳</sup> در نیجریه انجام شد. در ابتدا بستر دریا به اندازه ۱۵ متر حفاری شد و کاهش سطح پیدا کرد. سپس خاکریز سنگی به ضخامت یک متر احداث شد. بهسازی خاک با استفاده از کوبه ای به وزن ۴۰ تن به منظور بهسازی خاکی به ضخامت ۱۵ متر انجام گرفت و بیش از ۵ مرحله تراکم دینامیکی در مناطق مختلف اعمال شد [۵]. در سال ۱۹۸۰، یک کارخانه آب شیرین کن که در ژاپن مونتاژ شده بود توسط یدک کش به منطقه یانبو<sup>۴</sup> در عربستان سعودی انتقال یافت و بر روی یک فونداسیون که در بستر دریا با استفاده از تراکم دینامیکی آماده شده بود قرار گرفت. بستر دریا از یک لایه ماسه لای دار سست به ضخامت ۸ متر تشکیل

1 . Udevalla  
2 . Sfax  
3 . Lagos  
4 . Yanbu

شده بود که ۴ متر فوقانی آن بسیار ناهمگن بود. از این رو ۴ متر فوقانی بستر دریا برداشته شده و مرجان های خرد شده جایگزین آن شد. سپس تراکم دینامیکی با استفاده از کوبه ای به وزن ۱۷ تن که در یک مربع شبکه بندی شده به فاصله ۸ متر سقوط می نماید انجام شد. تعداد ضربات در هر نوبت از فازهای تراکم بین ۱۰ تا ۱۲ بار متغیر بود [۵]. در سال ۲۰۱۰، تراکم دینامیکی به منظور بهسازی خاک بستر دریا در جنوب شرق آسیا مورد استفاده قرار گرفت. کوبه مشبک با سطح کوبش مربع شکل به ابعاد ۱/۱×۷/۷ متر و با وزن ۳۸/۵ تن، طوری طراحی شد که در هنگام حرکت در عمق آب، استهلاک سرعت کوبه توسط آب به حداقل رسد و پس از رها شدن از ارتفاع ۵ متری بالای سطح آزاد آب، با حداکثر سرعت ۴۳۰ متر بر دقیقه به سطح خاک بستر دریا برخورد نماید [۹]. فنگ و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی روش تراکم دینامیکی با انرژی زیاد برای بهسازی خاک یک منطقه ساحلی پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که روش ابر تراکم دینامیکی خاک یک راه موثر جهت بهسازی خاک درشت دانه در مناطق ساحلی است. این روش کمک می کند تا بتوان به عمق بهبود بیشتر خاک و ظرفیت باربری بالاتر زمین در مقایسه با روش تراکم دینامیکی با انرژی کم دست یافت [۱۰]. عبدی زاده (۲۰۱۱)، با بررسی نتایج یک سری آزمون های مدل سازی شده آزمایشگاهی بر روی خاک دانه ای نشان داد که هر چقدر قطر کوبه ها افزایش یابد جهت بالا بردن راندمان کوبش باید از کوبه های با وزن بیشتر استفاده نمود. نتایج نشان داد که کوبه های با انرژی یکسان ولی با وزن و ارتفاع سقوط متفاوت، نمی توانند منجر به ظرفیت باربری یکسان در خاک گردند زیرا نیروی محرک های آنها با یکدیگر برابر نیست. همچنین علی رغم افزایش تعداد کوبش ها، انرژی حاصل از کوبش با کوبه های کوچک، برای متراکم کردن لایه های بالایی صرف می شود و نمی تواند به لایه های پایین تر برسد [۱۱]. میچلین و همکاران (۲۰۱۵)، عملیات بهبود خاک را که برای پی عمیق کارخانه تبدیل انرژی التاس در آلیاگا ترکیه انجام شده بود، در قالب یک مطالعه موردی بررسی کردند. به منظور افزایش ظرفیت باربری پی های عمق و همچنین تنظیم نشست های کلی و جزئی در کل منطقه، تراکم دینامیکی همراه با جایگزینی دینامیکی انجام شد. نتایج نشان داد که با توجه به شرایط بحرانی پس از بهبود، ظرفیت باربری خاک

جدول ۱: مشخصات ژئوتکنیکی ماسه بندر انزلی

Table 1. Geotechnical properties of Anzali Port sand

$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$\gamma_{d_{min}}$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{d_{max}}$ ( $kN/m^3$ )	$C_c$	$C_u$	$D_{max}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	USCS
۲/۶۷	۰/۷۱	۰/۵۷	۱۵/۶	۱۶/۹	۱/۲	۲/۴	۱/۱۸	۰/۲۱	SP-SM



شکل ۲: خاک اشباع و ارتفاع آب روی آن  
Fig. 2. Saturated soil and water height on it



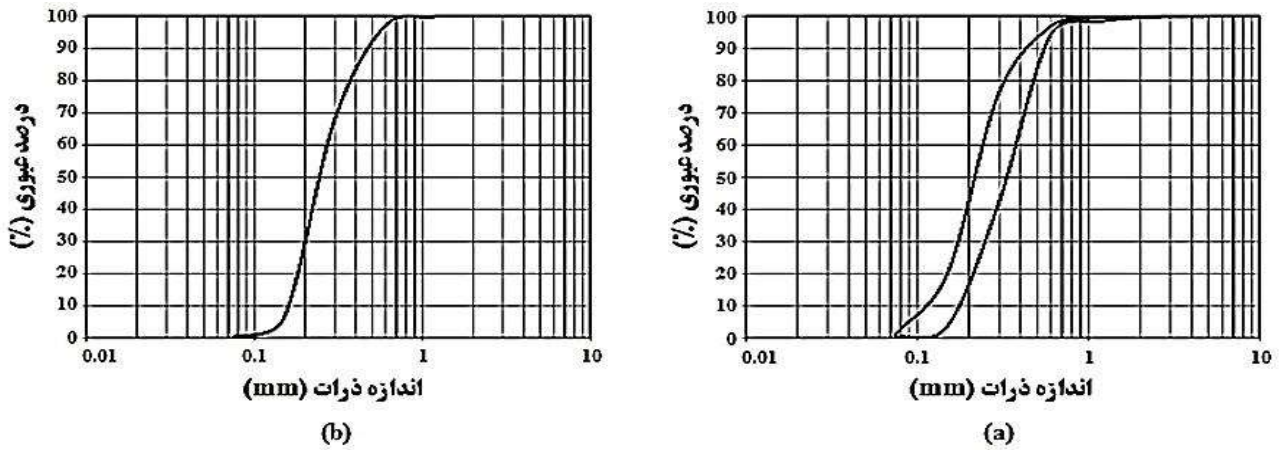
شکل ۱: تانک آزمایش  
Fig. 1. Test tank

آرایش سوراخ های کوبه، بر سرعت برخورد با خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و عمق حفره ایجاد شده در آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- مصالح و روش ها

مطابق شکل ۱، یک تانک آزمایش به شکل مکعب و با ابعاد  $100 \times 100 \times 80$  سانتی متر طوری طراحی شده است که اثر جداره ها بر نتایج ناچیز باشد. جداره های طرفین و کف تانک از ورق فولادی ۲ میلی متری با جوشکاری دوطرفه و جدار پیشانی آن از شیشه ۱۰ میلی متری تشکیل شده است. جهت اطمینان از عدم نشست آب درون تانک، محل جوشکاری ورق های فولادی و اتصال شیشه به آنها توسط چسب آب بندی به طور مناسب پوشش داده می شود و در سمت چپ تانک، یک شیر جهت تخلیه آب درون تانک در مواقع ضروری تعبیه شده است. به منظور جذب امواج ناشی از برخورد کوبه با سطح خاک توسط جداره های تانک و عدم بازگشت آن به دامنه محاسباتی پس از برخورد به مرزهای طرفین، جداره های اطراف تانک آزمایش را با ورق

پس از بهسازی ۳۲۱ کیلوپاسکال بود و ضوابط پروژه که ۳۰۰ کیلو پاسکال است را رعایت می کند [۱۲]. شن و همکاران (۲۰۱۸)، یک مطالعه موردی در مورد اثر تراکم دینامیکی بر پتانسیل روانگرایی خاک ارائه کردند. نتایج نشان داد که پتانسیل روانگرایی در لایه بحرانی زمین بهسازی شده می تواند توسط تراکم دینامیکی کاهش یابد [۱۳]. در پژوهش های انجام شده، به منظور کاهش اثر آب بر استهلاک سرعت برخورد کوبه با بستر دریا از کوبه های مشبک استفاده شده است؛ اما تعداد و ابعاد سوراخ ها و مساحت آنها که باید متناسب با ابعاد و مساحت کوبه و جان مشبک آن باشد، کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. زیرا کوبه های فراساحلی باید طوری طراحی گردد که علاوه بر برخورداری از کمترین استهلاک سرعت در هنگام حرکت در عمق آب و دستیابی به بیشترین سرعت در لحظه برخورد با بستر دریا، نفوذ قابل قبولی به خاک داشته و با ایجاد عمق حفره مناسب در آن، منجر به حداکثر شعاع و عمق بهبود خاک بستر دریا گردد. در این مقاله، ورود کوبه های مشبک ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی  $3 \times 3$ ،  $4 \times 4$  و  $5 \times 5$  به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و

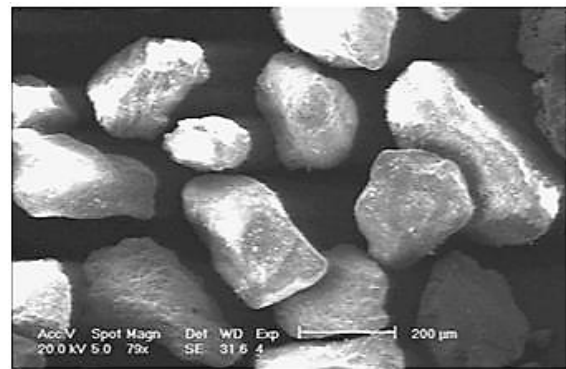


شکل ۳: (a) دامنه توزیع و (b) شاخص دانه بندی نمونه ماسه بندر انزلی

Fig. 3. (a) Amplitude distribution and (b) aggregation index for Anzali Port sand samples

پلی استایرن به ضخامت ۵ سانتی متر پوشش داده می شود. سپس مطابق شکل ۲، مقادیر مناسب از ماسه لای دار بدانه بندی شده که از بستر دریا خزر در بندر انزلی تهیه و مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است، در سه لایه ۱۰ سانتی متری در داخل تانک آزمایش ریخته و کوبیده می شود تا به ضخامت ۳۰ سانتی متر و درجه تراکم ۴۰٪ برسد. زیرا خاک بستر دریا به دلیل رسوبگذاری و تحکیم رسوبات در اثر موج و بارگذاری طولانی مدت ناشی از وزن آب روی آن، از تراکم نسبی برخوردار است. سپس تانک آزمایش تا ارتفاع ۴۰ سانتی متر بالای سطح خاک به آرامی با آب پر می شود تا تراکم اولیه خاک دستخوش تغییر نگردد. پس از آن کوبه های مشبک از ارتفاع ۵۰ سانتی متری بالای سطح آزاد آب از حالت سکون رها می گردد و مسیر حرکت آنها در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا لحظه برخورد با سطح خاک توسط دوربین پرسرعت ثبت می گردد. پس از برخورد کوبه با سطح خاک، عمق حفره ایجاد شده در آن بعد از هر ضربه اندازه گیری می شود.

در شکل های ۳ و ۴، به ترتیب دامنه توزیع و شاخص دانه بندی نمونه ماسه بندر انزلی و تصویر میکروسکوپی آن نشان داده شده است. در شکل ۵، شکل هندسی کوبه های مذکور نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد سه نوع کوبه مشبک با تعداد سوراخ های متغیر ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ برای تراکم دینامیکی خاک شبیه سازی شده از بستر دریا به روش آزمایشگاهی ساخته شده است. ارتفاع کوبه ها طوری در نظر گرفته شده است که با توجه به مصالح به کار رفته در



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه بندر انزلی

Fig. 4. Microscopic image of Anzali Port sand sample



سوراخ ۲۵  
آرایش: ۵×۵

سوراخ ۱۶  
آرایش: ۴×۴

سوراخ ۹  
آرایش: ۳×۳



شکل ۵: کوبه های مشبک با آرایش ماتریسی

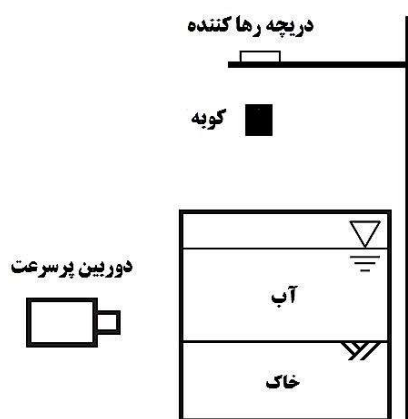
Fig. 5. Lattice pounders with matrix arrangement



جدول ۲: مشخصات هندسی کوبه های مشبک

Table 2. Geometric properties of lattice pounders

تعداد سوراخ	آرایش سوراخ	ابعاد بیرونی کوبه (cm)	ابعاد سوراخ (cm)	ضخامت جدار (cm)	فاصله بین سوراخ‌ها (cm)	مساحت سوراخ‌ها (cm <sup>۲</sup> )	مساحت جان مشبک کوبه (cm <sup>۲</sup> )	مساحت دیواره سوراخ‌ها (cm <sup>۲</sup> )	ممان اینرسی (cm <sup>۴</sup> )
۹	۳×۳	۱۰×۱۰×۲۲/۵	۲/۸۳	۰/۲۵	۰/۵	۷۵/۲۵	۲۴/۷۵	۲۲۹۵	۱۹
۱۶	۴×۴	۱۰×۱۰×۱۶/۵	۲	۰/۲۵	۰/۵	۶۴	۳۶	۲۱۱۲	۲۴
۲۵	۵×۵	۱۰×۱۰×۱۴/۵	۱/۵	۰/۲۵	۰/۵	۵۶/۲۵	۴۳/۷۵	۲۱۷۵	۲۹/۱۶



شکل ۷: تصویر شماتیک از تجهیزات آزمایش

Fig. 7. Schematic image of the test equipment



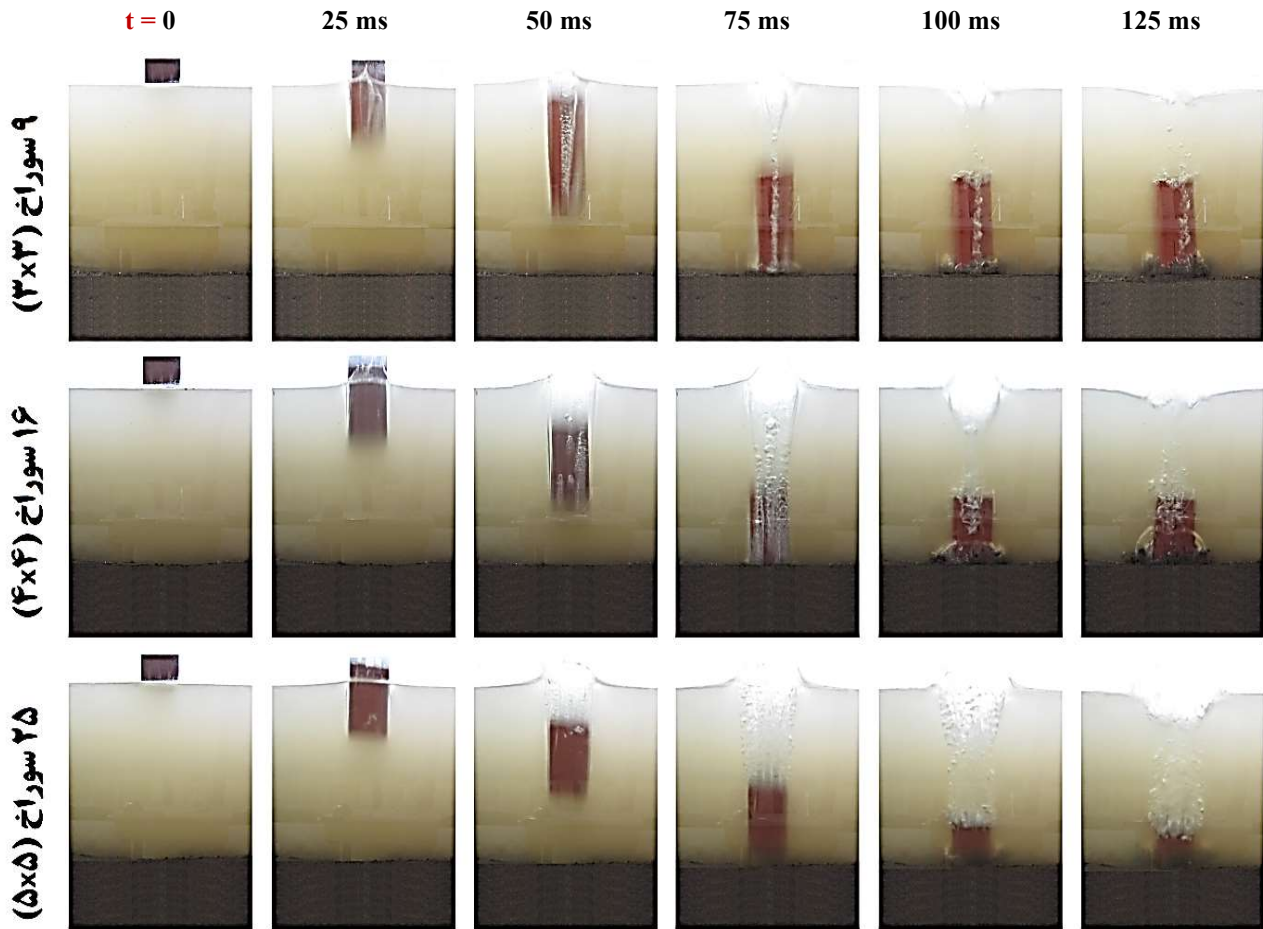
شکل ۶: دوربین فیلمبرداری پرسرعت

Fig. 6. High-speed camera

حرکت در عمق آن تا لحظه برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش مورد استفاده قرار می گیرد. دوربین فیلم برداری پرسرعت در فاصله مناسب از جداره شیشه ای تانک قرار گرفته و حالت ضبط فیلم فعال می گردد. پس از برطرف شدن تلاطم آب داخل تانک و رسیدن به حالت ساکن، کوبه از دریچه رها کننده که در ارتفاع ۵۰ سانتی متری بالای سطح آزاد آب قرار دارد، با سرعت اولیه صفر متر بر ثانیه سقوط می نماید. بر طبق رابطه سقوط آزاد اجسام، کوبه در هنگام برخورد با سطح آزاد آب به سرعت ۴/۴۳ متر بر ثانیه می رسد. لحظه ورود کوبه به داخل آب و حرکت در عمق آن تا برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش، توسط دوربین فیلم برداری ضبط می گردد و پس از اتمام آزمایش، تصاویر ضبط شده جهت پردازش به کامپیوتر منتقل می گردد. سپس فریم های مربوط به حرکت کوبه های مشبک در عمق آب در زمان های مختلف، به صورت تصاویر جداگانه تهیه شده

هر کوبه، وزن یکسان برابر با ۳/۸۵ کیلوگرم داشته باشند. مشخصات هندسی این کوبه های مشبک مطابق جدول ۲ می باشد. مشاهدات آزمایشگاهی شامل حرکت کوبه در عمق آب و برخورد با سطح خاک بستر مدل و ایجاد حفره در آن است. محل رها شدن کوبه طوری تنظیم می شود که کوبه پس از هر بار رها شدن در یک ناحیه مشخص از خاک ضربه وارد نماید. پس از هر کوبش، مقدار نفوذ کوبه در خاک و به عبارتی عمق حفره اندازه گیری و ثبت می گردد. عملیات کوبش تا توقف نفوذ کوبه در خاک ادامه می یابد و پس از آن که عمق حفره در اثر برخورد کوبه، تغییر چشمگیری نداشت، مقدار نشست خاک در آن ناحیه اندازه گیری می شود.

مطابق شکل ۶، یک دوربین فیلم برداری پرسرعت از نوع Chronos 1.4 با ۱۰۵۰ فریم بر ثانیه و وضوح تصویر ۱۰۲۴×۱۲۸۰ پیکسل جهت تهیه تصاویر حاصل از ورود کوبه های مشبک به آب و

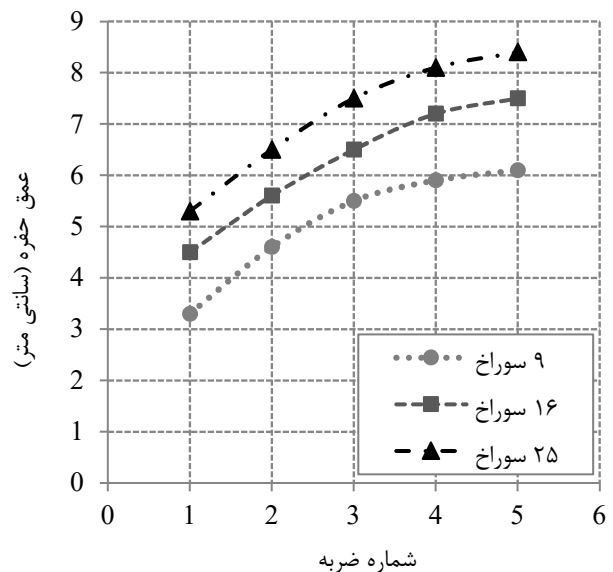


شکل ۸: مشاهدات آزمایشگاهی مسأله ورود کوبه های مشبک به آب و لحظه برخورد آنها با سطح خاک  
 Fig. 8. Experimental observations on water entry of lattice pounders and impact on soil surface

و مورد بحث و تحلیل قرار می گیرد.  
 در شکل ۷، تصویر شماتیک از تجهیزات آزمایش نشان داده شده است که شامل تانک آزمایش، کوبه مشبک، دریچه رها کننده و دوربین پرسرعت است.

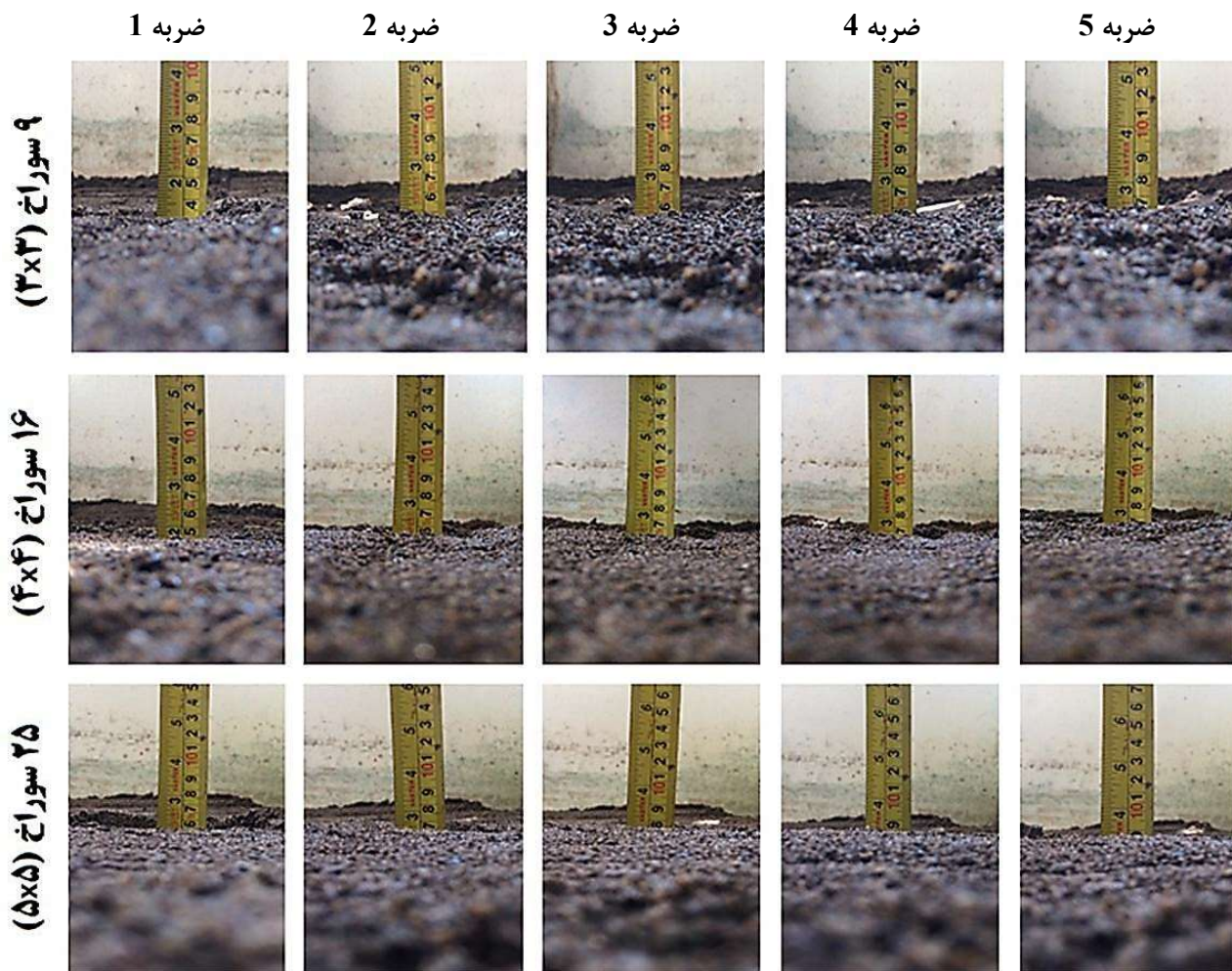
### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۸، مشاهدات آزمایشگاهی مسأله ورود کوبه های مشبک ۹ سوراخ، ۱۶ سوراخ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و لحظه برخورد آنها با سطح خاک پس از رها شدن از ارتفاع ۵۰ سانتی متری بالای سطح آزاد آب نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، در زمان های مشابه کوبه مشبک ۹ سوراخ که از مساحت سوراخ بیشتری نسبت به سایر کوبه های مشبک برخوردار است، عمق بیشتری از آب را در یک زمان مشخص



شکل ۹: تاثیر تعداد و آرایش سوراخ های کوبه مشبک بر عمق نفوذ آن در خاک پس از هر ضربه

Fig. 9. The effect of holes number and arrangement of lattice pounders on crater depth after each impact



شکل ۱۰: مشاهدات آزمایشگاهی از تاثیر تعداد و آرایش سوراخهای کوبه مشبک بر عمق حفره ایجاد شده در خاک پس از هر ضربه

Fig. 10. Experimental observations of the effect of holes number and arrangement of lattice pinders on crater depth after each impact

طی نموده و در زمان کمتر و با سرعت بیشتری به سطح خاک بستر مدل آزمایشگاهی برخورد می نماید. همچنین کوبه مشبک ۲۵ سوراخ که از مساحت سوراخ کمتر و مساحت جان مشبک بیشتری برخوردار است، عمق کمتری از آب را در یک زمان مشخص طی نموده و در زمان بیشتر و با سرعت کمتری به سطح خاک بستر مدل آزمایشگاهی برخورد می نماید. پس از برخورد کوبه های مشبک با آرایش متفاوت سوراخ ها با سطح خاک، کوبه مشبک ۲۵ سوراخ علی رغم اینکه از کمترین سرعت در لحظه برخورد با سطح خاک برخوردار است، به علت مساحت بیشتر جان مشبک کوبه و انتقال انرژی بیشتری به خاک نسبت به سایر کوبه ها، منجر به افزایش نشست آن می گردد. همچنین کوبه مشبک ۹ سوراخ علی رغم برخورداری از بیشترین سرعت در لحظه برخورد با سطح خاک، به علت اینکه از کمترین

مساحت جان مشبک نسبت به سایر کوبه ها برخوردار است، با انتقال انرژی به مراتب کمتری به خاک، منجر به نشست کمتر آن می شود. لذا می توان نتیجه گرفت که جان مشبک کوبه تاثیر بسزایی در سرعت برخورد کوبه با سطح خاک و به تبع آن نشست خاک و شعاع و عمق بهبود آن دارد. به طوری که افزایش مساحت جان مشبک از یک طرف منجر به کاهش سرعت کوبه در لحظه برخورد با بستر دریا و از طرف دیگر منجر به انتقال انرژی بیشتری به خاک و افزایش نشست و شعاع و عمق بهبود آن می شود.

لذا مطابق شکل ۹ که بیانگر تاثیر تعداد و آرایش سوراخ های کوبه مشبک بر عمق نفوذ آن در خاک پس از هر ضربه است، ملاحظه می گردد که کوبه مشبک ۲۵ سوراخ به علت برخورداری از بیشترین مساحت جان مشبک نسبت به سایر کوبه های مشبک، پس از برخورد

طی نموده و در زمان کمتر و با سرعت بیشتری به سطح خاک بستر مدل آزمایشگاهی برخورد می نماید. همچنین کوبه مشبک ۲۵ سوراخ که از مساحت سوراخ کمتر و مساحت جان مشبک بیشتری برخوردار است، عمق کمتری از آب را در یک زمان مشخص طی نموده و در زمان بیشتر و با سرعت کمتری به سطح خاک بستر مدل آزمایشگاهی برخورد می نماید. پس از برخورد کوبه های مشبک با آرایش متفاوت سوراخ ها با سطح خاک، کوبه مشبک ۲۵ سوراخ علی رغم اینکه از کمترین سرعت در لحظه برخورد با سطح خاک برخوردار است، به علت مساحت بیشتر جان مشبک کوبه و انتقال انرژی بیشتری به خاک نسبت به سایر کوبه ها، منجر به افزایش نشست آن می گردد. همچنین کوبه مشبک ۹ سوراخ علی رغم برخورداری از بیشترین سرعت در لحظه برخورد با سطح خاک، به علت اینکه از کمترین



شکل ۱۱: کوبه مورد استفاده در عملیات تراکم دینامیکی فراساحلی با طراحی ویژه [۱]

Fig. 11. Lattice pounder used in offshore dynamic compaction with special design [1]

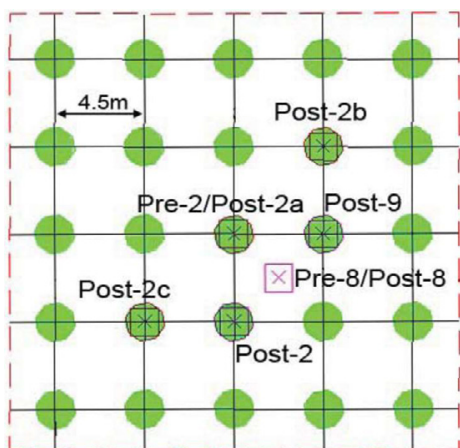
علاوه بر برخورداری از کمترین استهلاک سرعت در هنگام حرکت در عمق آب و دستیابی به بیشترین سرعت در لحظه برخورد با بستر دریا، نفوذ قابل قبولی به خاک داشته و در عین حال به علت برخورداری از مساحت مناسب جان مشبک، با انتقال بیشترین انرژی به سطح خاک، منجر به ایجاد نشست مورد نظر در خاک بستر دریا و دستیابی به حداکثر شعاع و عمق بهبود آن گردد.

#### ۴- مقایسه موردی روند نتایج آزمایشگاهی و محلی

با توجه به وجود برخی مشکلات در انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس و واقعی، به لحاظ تجهیزات آزمایش و هزینه اجرایی زیاد، معمولاً از مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک استفاده می‌شود. ولی به علت وجود اثر مقیاس و تاثیر احتمالی بر نتایج، مدل آزمایشگاهی نمی‌تواند دقیقاً همان رفتار مدل اصلی را منعکس نماید. اثر مقیاس به ویژه در خاک‌های دانه‌ای بیشتر اهمیت دارد. در طراحی تراکم دینامیکی بستر دریا، به علت حجم وسیع عملیات اجرایی که نیازمند تجهیزات ویژه و هزینه‌های زیاد است، از مدل فیزیکی در مقیاس کوچک بهره‌گرفته می‌شود و نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی با نتایج عددی صحت‌سنجی می‌گردد. با توجه به اینکه در بررسی اثر مقیاس، پارامترهایی مانند جنس و سستی خاک، عمق آب، وزن کوبه، ارتفاع سقوط و ... نقش تعیین‌کننده‌ای در نتایج حاصله دارد؛ لذا هدف از این مقایسه، فقط تطبیق روند نتایج آزمایشگاهی موجود با روند نتایج بهسازی بستر دریا به روش تراکم دینامیکی در یک مطالعه موردی می‌باشد و از مقایسه دقیق اثر

با سطح خاک بستر تانک آزمایش، با انتقال انرژی بیشتری به خاک، منجر به ایجاد حفره عمیق‌تری در خاک می‌شود. همچنین کمترین عمق حفره ایجاد شده در خاک مربوط به کوبه مشبک ۹ سوراخ با کمترین مساحت جان مشبک و انتقال کمتر انرژی به خاک است. به طوری که کوبه‌های ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ پس از برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش، در اولین ضربه به ترتیب منجر به ایجاد حفره به عمق ۳/۳، ۴/۵ و ۵/۳ سانتی‌متر و در ضربه پنجم منجر به ایجاد حفره به عمق ۶/۱، ۷/۵ و ۸/۴ سانتی‌متر می‌شوند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که میزان انرژی انتقال یافته از کوبه به سطح مشخصی از خاک و نشست آن وابسته به مساحت جان مشبک کوبه است. بنابراین هر چه مساحت جان مشبک کوبه بیشتر باشد، انرژی بیشتری از کوبه به خاک منتقل می‌گردد و نشست خاک افزایش می‌یابد [۱۴].

در شکل ۱۰، مشاهدات آزمایشگاهی از تاثیر تعداد و آرایش سوراخ‌های کوبه مشبک بر عمق حفره ایجاد شده در خاک پس از هر ضربه نشان داده شده است. در اثر برخورد کوبه‌های مشبک با آرایش متفاوت سوراخ‌ها با سطح خاک و اندازه‌گیری مقادیر نفوذ آنها، ملاحظه می‌گردد که عمق حفره ایجاد شده در خاک بعد از هر ضربه، افزایش می‌یابد. اما در تمامی مدل‌های آزمایشگاهی با آرایش متفاوت سوراخ‌های کوبه، این افزایش عمق حفره تا ضربه چهارم به طور چشمگیری ادامه دارد و پس از آن، تغییر کمی را در عمق حفره ایجاد شده در خاک نشان می‌دهد. لذا در طراحی کوبه‌های مشبک جهت تراکم دینامیکی بستر دریا، تعداد و ابعاد سوراخ‌ها و به عبارتی مساحت آنها باید متناسب با ابعاد و مساحت کوبه باشد. به طوری که



شکل ۱۳: نقاط اجرای عملیات تراکم دینامیکی و انجام آزمایش فشارسنجی [۹]

Fig. 13. Trial zone and PMT locations [9]

عملیات تراکم دینامیکی در معرض ۳۰ ضربه قرار گرفت. علاوه بر این، ۳ تا ۶ ضربه به عنوان مرحله اتوکشی در کل منطقه بهسازی اعمال شد. تجربیات و پروژه های قبلی تیم اجرایی منارند نشان داد که مقاومت آب می تواند به طور قابل ملاحظه ای اثر ارتفاع سقوط کوبه را کاهش دهد. از این رو، ارتفاع سقوط کوبه در طی عملیات تراکم دینامیکی فراساحلی، ۵ متر بالاتر از سطح دریا در نظر گرفته شد. سنسورهای ثبت کننده سرعت قرار گرفته بر روی جرثقیل نشان داد که حداکثر سرعت در طول عملیات در محدوده ۴۳۰ متر بر دقیقه (۷/۱ متر بر ثانیه) است. این سرعت معادل سقوط آزاد کوبه از ارتفاع ۲/۶ متر با فرض عدم وجود آب است و این فرضیه بدیع را تایید می کند که بیشتر انرژی های سینماتیکی کوبه به وسیله مقاومت آب از بین می رود [۹].

در این پروژه تراکم دینامیکی بستر دریا، علاوه بر آزمایش های فشارسنجی که به عنوان روش اولیه تایید انجام شد، اندازه گیری ها و مشاهدات بیشتر نیز برای به دست آوردن حداکثر اطلاعات صورت گرفت. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، نفوذ کوبه به خاک برای هر ضربه اندازه گیری شد. مشاهده شد که کوبه در طول چهار ضربه اول بیشترین نفوذ را به خاک داشت. سپس سرعت نفوذ آن به سرعت کاهش یافت تا جایی که بعد از ضربه ۱۵، عملاً هیچ گونه نفوذی مشاهده نشد. در طول ۱۵ ضربه اول، مقدار نفوذ کوبه به خاک و به عبارتی عمق حفره ایجاد شده در خاک از ۱/۱ تا ۱/۷ متر متغیر بود. از مقایسه این شکل با ضخامت خاک نرم تا قبل

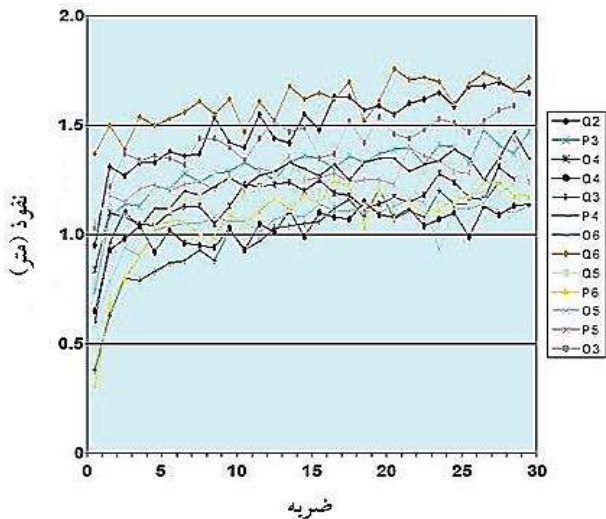


شکل ۱۲: عملیات تراکم دینامیکی فراساحلی با استفاده از جرثقیل با ظرفیت باربری بالا و شناور [۱]

Fig. 12. Offshore dynamic compaction operations using barge and crane with high load capacity [1]

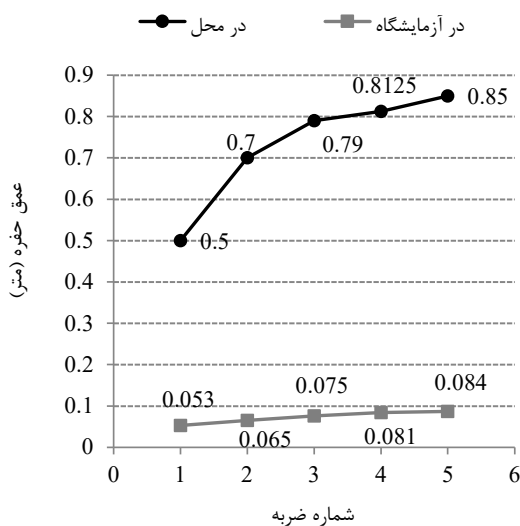
مقیاس صرف نظر شده است. به این منظور ابتدا عمق حفره ایجاد شده در آزمایشگاه توسط کوبه مشبک ۲۵ سوراخ با آرایش ۵x۵ با عمق حفره ایجاد شده در پروژه بهسازی خاک بستر دریا به روش تراکم دینامیکی در منطقه ای به وسعت ۲۲/۲۲x۵/۵ مترمربع در جنوب شرقی آسیا مقایسه می گردد. در این پروژه به منظور بهسازی رسوبات نرم دریایی که در عمق ۳۰ متری از سطح آزاد آب قرار دارد، از روش تراکم دینامیکی استفاده گردید که پروژه مذکور از جمله عمیق ترین پروژه های بهسازی بستر دریا به روش تراکم دینامیکی فراساحلی است [۹]. در این پروژه از یک کوبه فراساحلی ویژه به وزن ۳۸/۵ تن که به صورت مشبک طراحی شده است، به منظور تراکم دینامیکی بستر دریا استفاده شد. شکل خاص این کوبه منجر به حداقل مقاومت آب در طول سقوط کوبه و حرکت در عمق آب دریا می شود. کوبه مورد استفاده در این پروژه با شبکه بندی دو طرفه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ابعاد فوقانی این کوبه ۲/۲x۳/۳ متر و ابعاد تحتانی آن ۱/۱x۷/۷ است. به علت سنگینی نسبی کوبه و وزن نامتعارف آن، یک جرثقیل با ظرفیت باربری بالا و با پایداری کافی برای بالا بردن کوبه مورد نیاز بود. برای این منظور از یک جرثقیل متحرک Liebherr HS895 استفاده شد. مطابق شکل ۱۲، یک شناور به ابعاد ۵۰x۱۵ مترمربع به منظور حمل جرثقیل، کوبه و سایر تجهیزات جهت اجرای عملیات بهسازی بستر دریا مورد استفاده قرار گرفت [۹].

در شکل ۱۳، نقاط اجرای عملیات تراکم دینامیکی و انجام آزمایش فشارسنجی نشان داده شده است. در این پروژه، نقاط اجرای



شکل ۱۴: نفوذ کوبه به خاک در هر ضربه [۹]

Fig. 14. Ponder penetration at several dynamic compaction print locations [9]



شکل ۱۵: مقایسه عمق حفره ایجاد شده در خاک ناشی از برخورد کوبه مشبک ۲۵ سوراخ با آرایش ۵×۵ در محل و آزمایشگاه

Fig. 15. Comparison of crater depth formed in-situ and in laboratory

به کوبه مشبک ۹ سوراخ با کمترین مساحت جان مشبک می باشد. به طوری که کوبه های ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ پس از برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش، در اولین ضربه به ترتیب منجر به ایجاد حفره به عمق ۳/۳، ۴/۵ و ۵/۳ سانتی متر و در ضربه پنجم منجر به ایجاد حفره به عمق ۶/۱، ۷/۵ و ۸/۴ سانتی متر شدند. از این رو، می توان نتیجه گرفت که سرعت برخورد کوبه های مشبک وابسته به مساحت سوراخ های آن و نشست خاک، میزان انرژی انتقال یافته از

از تراکم دینامیکی می توان دریافت که ضربه کوبه می تواند به طور موثر مصالح درشت دانه ریخته شده را به انتهای لایه خاک نرم با ۴ تا ۱۲ ضربه اول هدایت و سپس تراکم بیشتر لایه درشت دانه صورت گیرد. نشست کل خاک توسط دستگاه انعکاس صدا اندازه گیری شد و بررسی ها نشان داد که به علت تراکم دینامیکی بستر دریا و بهسازی خاک، مصالح درشت دانه ریخته شده ۳۸ سانتی متر کاهش ضخامت یافته است [۹].

در شکل ۱۵، به مقایسه عمق حفره ایجاد شده در خاک ناشی از برخورد کوبه مشبک ۲۵ سوراخ با آرایش ۵×۵ در محل و آزمایشگاه پرداخته شده است. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی تراکم دینامیکی خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و نتایج حاصل از مشاهدات تجربی پروژه بهسازی خاک بستر دریا در جنوب شرقی آسیا ملاحظه گردید که در هر ضربه، عمق حفره ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی در حدود ۰/۱ عمق حفره ایجاد شده در مدل درجا می باشد. لازم به ذکر است که مقیاس وزن کوبه در آزمایشگاه به کوبه مورد استفاده در محل برابر با ۱/۱۰۰۰۰ و مقیاس ارتفاع سقوط کوبه از سطح آزاد آب در آزمایشگاه به محل برابر با ۱/۱۰ است. لذا مطابق رابطه ۱ نسبت انرژی حاصل از برخورد کوبه با خاک در مدل آزمایشگاه به پروژه در محل برابر با ۱/۱۰۰۰۰۰ می باشد.

$$EA = \frac{NWH P}{S^2} \quad (1)$$

که در آن N تعداد ضربات در هر مرحله، W جرم کوبه، H ارتفاع سقوط، P تعداد مراحل اعمال ضربه و S فاصله نقاط شبکه کوبش است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ورود کوبه های مشبک ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و آرایش سوراخ های کوبه بر سرعت برخورد آن با خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و عمق حفره ایجاد شده در آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات عمق حفره ایجاد شده در خاک ناشی از برخورد کوبه مشبک ۲۵ سوراخ به علت برخورداری از بیشترین مساحت جان مشبک نسبت به سایر کوبه های مشبک، بیشتر است و کمترین تغییرات عمق حفره ایجاد شده در خاک مربوط

- [7] J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Menge, State of the art report: construction processes, in: 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering: TC17 meeting ground improvement, 2009, pp. 130.
- [8] L. Menard, L'utilisation de la consolidation dynamique pour la réalisation du nouveau port de pêche de Sfax en Tunisie, Navires, Ports et Chantiers, (1981).
- [9] B. Hamidi, H. Nikraz, K. Yee, S. Varaksin, L. Wong, Ground improvement in deep waters using dynamic replacement, in: The Proceedings of The Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2010, pp. 848-853.
- [10] S.-J. Feng, W.-H. Shui, L.-Y. Gao, L.-J. He, Application of high energy dynamic compaction in coastal reclamation areas, Marine Georesources and Geotechnology, 28(2) (2010) 130-142.
- [11] Y. Abdizadeh, Effect of poulder shape and diameter in dynamic compaction of loose granular soils, in: 3rd National Conference on Civil Engineering, Khomeinishahr, Iran, 2012. (in Persian)
- [12] A. Michelin, A. Khatchadourian, H. Durgunoglu, O. Akcakal, A case study on soil improvement with dynamic compaction and dynamic replacement, in, 2015.
- [13] M. Shen, J.R. Martin, C.-S. Ku, Y.-C. Lu, A case study of the effect of dynamic compaction on liquefaction of reclaimed ground, Engineering Geology, 240 (2018) 48-61.
- [14] B. Hamidi, J. Debats, H. Nikraz, S. Varaksin, Offshore ground improvement records, Australian Geomechanics, 48(4) (2013) 111-122.

کوبه به خاک و شعاع و عمق بهبود آن وابسته به مساحت جان مشبک کوبه می باشد. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی تراکم دینامیکی خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و نتایج حاصل از مشاهدات تجربی پروژه بهسازی خاک بستر دریا در جنوب شرقی آسیا ملاحظه گردید که در هر ضربه، عمق حفره ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی در حدود ۰/۱ عمق حفره ایجاد شده در مدل درجا بود. از این رو، در طراحی عملیات تراکم دینامیکی بستر دریا، می توان یک نمونه از این کار را با مقیاس کوچک در آزمایشگاه و در نرم افزار شبیه سازی کرد و پس از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی و صحت سنجی و کالیبره کردن نرم افزار، عملیات تراکم دینامیکی را در مقیاس واقعی مدل سازی نمود.

### مراجع

- [1] B. Hamidi, Distinguished ground improvement projects by dynamic compaction or dynamic replacement, Curtin University, 2014.
- [2] J. Boulard, LA FORME DE RADOUB PREFABRIQUEE NO 10 DU PORT MILITAIRE DE BREST, (1974).
- [3] L. Menard, Fondation d'une cale de radoub à Brest, in: 6th International Harbor Conference, 1974.
- [4] J. Renault, P. Tourneur, La forme de radoub No. 10 à Brest, in: 6th International Harbor Conference, 1974.
- [5] M. Gambin, Menard Dynamic Consolidation, a New Method for Improving Foundation Beds Off-shore, in: International Symposium, Brugge, 1982.
- [6] L. Menard, La consolidation dynamique comme solution aux problemes de fondation: pour la construction de quais, terminaux, reservoirs de stockage et iles artificielles sur ols compressibles, in: 7th International Harbour Conference, 1978.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.H. Taghizadeh Valdi, M.R. Atrechian, A. Jafary Shalkoohy, S.A. Hosseini, Experimental study of the effect of holes number and arrangement of lattice poulder on offshore dynamic compaction, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 1923-1934.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15732.6014



