

تعیین مدول الاستیسته خاک دانه‌های خشک با آزمایش بارگذاری یک بعدی

- 1- عبدالله تبرئی، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران
- 2- سعید ابریشمی (نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
- 3- سید احسان سیدی حسینی‌نیا، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
- 4- نوید گنجیان، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران

چکیده

یکی از مسائل اصلی در مهندسی پی، تعیین نشست شالوده است. در خاک‌های دانه‌ای، نشست به صورت آنی و تابع مدول الاستیسته خاک است. روش‌های مختلفی برای تعیین مدول الاستیسته خاک وجود دارد که یکی از این روش‌ها، آزمایش بارگذاری یک بعدی به کمک دستگاه اودنومتر است. در پژوهش حاضر تعداد پنج آزمایش بارگذاری یک بعدی بر روی خاک دانه‌ای خشک در حالت متراکم صورت گرفته تا مقدار نشست الاستیک و مدول الاستیسته تعیین شوند. نتایج نشان می‌دهد که مدول الاستیسته به شدت غیر خطی و تابع فشار اعمالی بوده، با افزایش فشار، افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: مدول الاستیسته، خاک دانه‌ای، آزمایش بارگذاری یک بعدی، نشست آنی

1- مقدمه

برای طراحی شالوده یک ساختمان که وظیفه انتقال بار از سازه به زمین را بر عهده دارد، باربری زمین به گونه‌ای تعیین می‌شود که اولاً گسیختگی برشی در زمین رخ ندهد و ثانیاً نشست ایجاد شده در زمین از نشست مجاز بیشتر نگردد. لذا یکی از مسائل اصلی در مهندسی پی، تعیین نشست است، به خصوص که غالباً با افزایش ابعاد شالوده، نشست تبدیل به معیار کنترل کننده باربری زمین می‌شود. نشست زمین می‌تواند شامل دو بخش نشست آنی و نشست تحکیمی باشد. در خاک‌های دانه‌ای فاقد ریزدانه و در زمین‌های خشک، نشست تحکیمی رخ نمی‌دهد و کل نشست، به صورت آنی می‌باشد.

نشست آنی با روش‌های متعددی قابل محاسبه است. ساده‌ترین روش برای محاسبه نشست آنی، استفاده از رابطه‌ای است که مبتنی بر تئوری الاستیسیته بدست آمده است [1]:

$$S_e = \frac{q \cdot B}{E_s} (1 - \nu_s^2) \cdot \alpha_r \quad (1)$$

که در آن، S_e نشست آنی، q سربار وارده از طرف شالوده، B ابعاد شالوده، E_s مدول الاستیسیته خاک، ν_s ضریب پواسون خاک و α_r پارامتری تابع صلبیت شالوده است. بنابراین، نشست آنی تابع دو دسته پارامتر است؛ یک دسته مربوط به شالوده و دسته دیگر مربوط به خاک است. پارامترهای مربوط به خاک، مشخصات الاستیک توده خاک هستند و با توجه به رابطه (1) و تجارب گذشته در خصوص بازه محدود تغییرات ضریب پواسون، می‌توان پی برد که اصلی‌ترین مشخصه خاک که نقش تعیین کننده در تعیین نشست دارد، مدول الاستیسیته خاک است.

جانبو و همکاران [2] رابطه جدیدی را جهت محاسبه نشست آنی متوسط شالوده‌های انعطاف‌پذیر واقع بر خاک رس اشباع (با ضریب پواسون 0/50) پیشنهاد کردند. این رابطه به صورت زیر است:

$$S_e = A_1 A_2 \frac{q \cdot B}{E_s} \quad (2)$$

که در آن، A_1 و A_2 تابع نسبت فاصله شالوده از بستر صلب و نسبت طول به عرض شالوده می‌باشد. سپس کریستین و کریر [3] ضرایب رابطه (2) را اصلاح نمودند.

نشست آنی خاک‌های دانه‌ای را می‌توان با استفاده از ضرائب تأثیر نیمه تجربی کرنش ارائه شده توسط اشمرتمن و هارتمن [4] نیز محاسبه نمود. طبق این روش، نشست آنی خاک‌های دانه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_e = C_1 \cdot C_2 \cdot (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z \cdot \Delta z}{E_s} \quad (3)$$

که در این رابطه I_z ضریب تأثیر کرنش، Δz ضخامت لایه، C_1 ضریب اصلاح اثر عمق مدفون شالوده، C_2 ضریب اصلاح اثر خزش خاک، q سربار ناشی از عمق مدفون و \bar{q} تنش وارده به شالوده می‌باشد.

محققین بسیاری سعی نمودند رابطه مناسبی بین مدول الاستیسیته خاک و عدد نفوذ استاندارد (N) و مقاومت نفوذ مخروط (q_c) برقرار کنند و مدول الاستیسیته را از آزمایش‌های SPT و CPT بدست آورند که از این جمله می‌توان به مایکل و گاردنر [5] و اشمرتمن [6] اشاره کرد. اشمرتمن روابط زیر را برای تعیین مدول الاستیسیته ماسه پیشنهاد کرد.

$$E_s = 766 N \quad (4)$$

$$E_s = 2q_c \quad (5)$$

جرجیادیس و باترفیلد [7] نیز با ارائه روشی که بر پایه شش گام بود، نشست آبی و دوران شالوده با بارگذاری برون محوریت را تعیین کرد.

روش‌های مختلفی برای تعیین مدول الاستیسیته خاک وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های برجا تقسیم نمود. در پژوهش حاضر از آزمایش بارگذاری یک بعدی خاک به کمک دستگاه تحکیم (اودنومتر)، برای تعیین مدول الاستیسیته استفاده شده است. بدین منظور تعداد پنج آزمایش بارگذاری یک بعدی بر روی خاک دانه‌ای خشک در حالت متراکم صورت گرفته تا مقدار نشست الاستیک و مدول الاستیسیته مصالح تعیین شوند.

2- مشخصات خاک

خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر، ماسه 131 فیروزکوه بوده که فاقد ریزدانه و دارای دانه‌بندی یکنواخت است. علت انتخاب این مصالح، یکی مشابهت آن با مصالح موجود در بسیار از نواحی بیابانی ایران و دیگری استفاده متعدد از آن در پژوهش‌های محققین ایرانی بوده است [8 تا 10].

جهت تعیین پارامترهای آن آزمایش‌های دانه‌بندی (مطابق با ASTM D422 [11])، تعیین درصد رطوبت (مطابق با ASTM D2216 [12])، تعیین توده ویژه (مطابق با ASTM D854 [13]) و تعیین دانسیته نسبی (مطابق با ASTM D4254 [14]) انجام گرفته است. مطابق نتایج بدست آمده و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM D2487 [15])، مصالح خاکی مورد استفاده از نوع ماسه بدانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. پارامترهای بدست آمده از مجموعه آزمایش‌های صورت گرفته بر روی ماسه مورد استفاده در مطالعه حاضر، در جدول (1) ارائه شده است. لازم به ذکر است دانسیته نسبی ماسه در آزمایش‌های صورت گرفته برابر 72 درصد و معادل حالت خاک متراکم بوده است.

جدول 1: مشخصات خاک دانه‌ای مورد استفاده در مطالعه حاضر

ردیف	نام مشخصه	علامت اختصاری	واحد	مقدار
1	اندازه مؤثر دانه‌ها	D ₁₀	mm	0/48
2	اندازه متوسط دانه‌ها	D ₅₀	mm	0/68
3	-	D ₆₀	mm	0/72
4	ضریب یکنواختی	C _u	-	1/5
5	ضریب خمیدگی	C _c	-	1/08
6	توده ویژه	G _s	-	2/71
7	میزان رطوبت	ω	%	0/23
8	وزن مخصوص خشک حداقل	(γ _d) _{min}	g/cm ³	1/30
9	وزن مخصوص خشک حداکثر	(γ _d) _{max}	g/cm ³	1/60

3- دستگاه آزمایش

یکی از روش‌های موجود جهت تعیین مدول الاستیسیته مصالح خاکی، استفاده از دستگاه اودنومتر و انجام آزمایش بارگذاری یک بعدی است. در شکل (1) تصاویری از دستگاه مورد استفاده در این پژوهش و در شکل (2) مقطع دستگاه اودنومتر نمایش داده شده است. از این دستگاه جهت انجام آزمایش تحکیم و استخراج پارامترهای لازم برای محاسبه نشست تحکیمی نیز استفاده می‌شود.

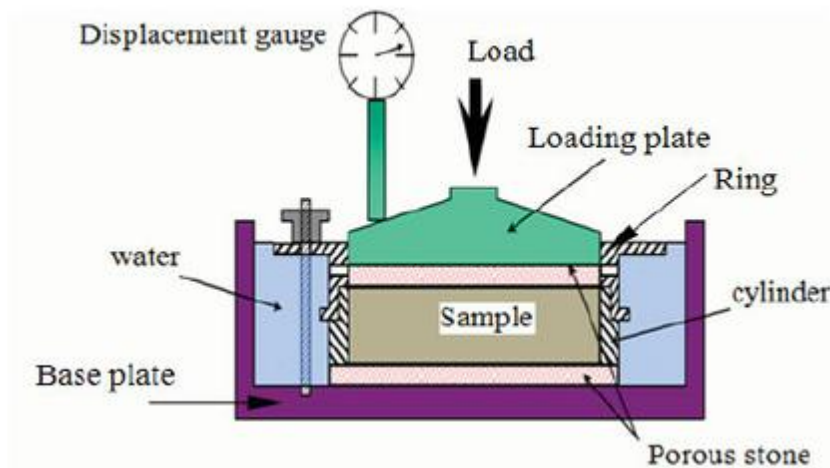


(ب)



(الف)

شکل 1: دستگاه اودنومتر؛ الف) نمای مقابل دستگاه و ب) نمای نزدیک از محفظه، دسته بارگذاری و گیج قائم



شکل ۲: مقطع محفظه و قالب دستگاه اودنومتر

این دستگاه از چهار بخش قالب آزمایش، یک گیج قائم جهت اندازه‌گیری جابجایی قائم، وزنه جهت اعمال سربار به نمونه و بازوی بارگذاری تشکیل شده است. جهت بررسی دقیق نتایج، روش انجام آزمایش در کلیه آزمایش‌ها یکسان بوده است. مراحل آزمایش شامل سه مرحله زیر بوده است:

۱- ریختن ماسه داخل قالب آزمایش: ماسه در چهار لایه داخل قالب آزمایش ریخته شده و در هر مرحله توسط کوبش و ارتعاش متراکم گردیده است. وزن ماسه داخل قالب آزمایش طوری تعیین گردیده که وزن مخصوص و تراکم نمونه برابر با حالت متراکم بدست آید.

۲- آماده‌سازی شرایط آزمایش: جعبه دستگاه بر روی دستگاه و در محل تعبیه شده قرار داده شده، اهرم بارگذاری به کمک پیچ نگهدارنده آن، تراز شده و دسته بارگذاری بر صفحه بارگذاری مماس گردیده است. در نهایت، گیج اندازه‌گیری تغییرشکل قائم صفر شده است.

۳- بارگذاری: وزنه‌ها متناسب با سربار قائم در محل مورد نظر قرارداده شده و با باز کردن پیچ نگهدارنده، نیرو به نمونه اعمال شده و همزمان نشست نمونه قرائت شده است. بارگذاری در چهار مرحله انجام شده و به ترتیب سربارهای قائم ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شده است.

۴- باربرداری: جهت تعیین مدول در حالت باربرداری، در نهایت کل سربار وارده به نمونه از روی آن برداشته شده و جابجایی قائم نمونه اندازه‌گیری شده است.

4- نتایج آزمایش بارگذاری یک بعدی

در این پژوهش جمعاً پنج آزمایش بارگذاری یک بعدی توسط دستگاه اودنومتر بر روی خاک ماسه‌ای خشک مورد استفاده در مطالعه حاضر انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در جدول (2) ارائه شده است.

جدول 2: نتایج آزمایش‌های بارگذاری یک بعدی بر روی ماسه مورد استفاده در مطالعه حاضر

مدول الاستیسیته (کیلوپاسکال)	نشست (میلی‌متر)					سربار اعمالی (کیلوپاسکال)
	تست 5	تست 4	تست 3	تست 2	تست 1	
1623	0/20	0/13	0/40	0/15	0/22	25
2405	0/27	0/21	0/60	0/20	0/51	50
3710	0/35	0/29	0/68	0/31	0/58	100
5646	0/46	0/38	0/78	0/39	0/66	200
13670	-0/19	-0/22	-0/60	-	-	0

مطابق شکل (2)، در آزمایش بارگذاری یک بعدی، نمونه داخل حلقه صلب فلزی قرار می‌گیرد و در جهت قائم بارگذاری می‌شود. لذا تغییرشکل فقط در راستای قائم رخ می‌دهد و بدلیل صلبیت حلقه، نمونه امکان کرنش جانبی ندارد. با توجه به تئوری الاستیسیته و روابط بین تنش و کرنش در شرایط کرنش جانبی صفر، بدست می‌آید که [16]:

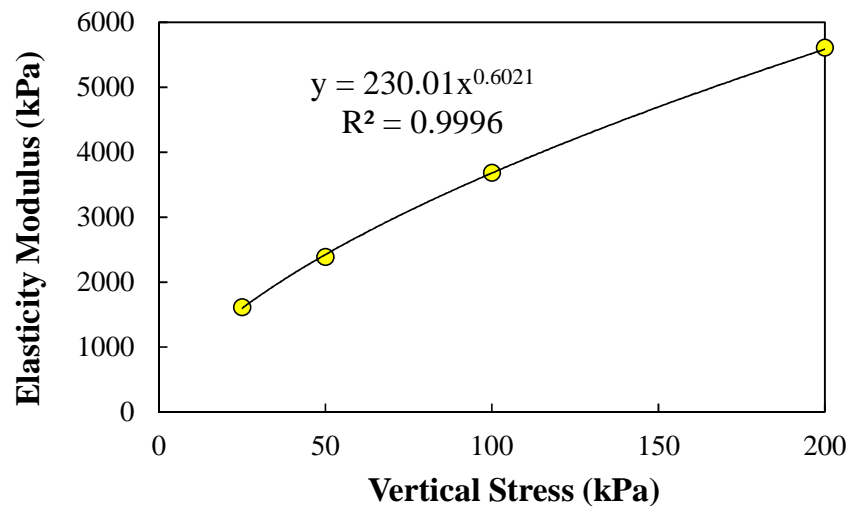
$$\sigma_v = \frac{E_s \cdot (1 - \nu_s)}{(1 - 2\nu_s)(1 + \nu_s)} \varepsilon_v \quad (6)$$

که در آن، σ_v تنش قائم و ε_v کرنش قائم است. رابطه اخیر به صورت‌های دیگری نیز قابل بیان است:

$$\sigma_v = E_{\text{oed}} \cdot \varepsilon_v = M \cdot \varepsilon_v \quad (7)$$

که در آن، E_{oed} مدول الاستیسیته اودنومتری و M مدول محصور شده است. بنابر روابط (6) و (7)، رابطه بین تنش و کرنش در آزمایش بارگذاری یک بعدی، رابطه‌ای خطی است که شیب خط تابع مدول الاستیسته و ضریب پواسون مصالح است و به صورت خلاصه، شیب خط را مدول اودنومتری می‌نامند.

در جدول (2)، مدول الاستیسیته با توجه به رابطه (6) و با فرض ضریب پواسون برابر 0/33 برای مصالح، محاسبه شده است. همچنین در این محاسبات، مقادیر نشست میانگین جهت محاسبه کرنش لحاظ شده است و داده‌های آزمایش سوم بدلیل اختلاف قابل ملاحظه با سایر آزمایش‌ها، از روند محاسبات حذف شده است. تغییرات مدول الاستیسیته با سربار قائم در شکل (3) نمایش داده شده است.



شکل 3: تغییرات مدول الاستیسیته با تنش قائم

چنانکه در شکل (3) ملاحظه می‌شود، مدول الاستیسیته ثابت نبوده و تابعی غیرخطی از تنش است. با استفاده از تکنیک برازش منحنی مشخص شده که تغییرات مدول الاستیسیته با تنش قائم از یک روند توانی تبعیت می‌کند. ضریب همبستگی بالای بدست آمده، نشان‌دهنده تطابق نتایج با رابطه توانی است. در مراجع مختلف نیز چنین روندی پیش‌بینی شده و رابطه‌ای برای بیان تغییرات مدول الاستیسیته با تنش ارائه شده است [17]:

$$E = E_i \cdot (\sigma)^n \quad (8)$$

که در آن، E_i مدول الاستیسیته اولیه و n توان تغییرات مدول با تنش است. با مقایسه رابطه (8) با رابطه بدست آمده در شکل (3) مشخص می‌شود که مدول الاستیسیته اولیه مصالح، حدود 230 کیلوپاسکال و توان، حدود 0/6 بدست آمده است. اغلب مراجع (نظیر [2]) مقدار قابل فرض برای پارامتر توان را حدود 0/5 توصیه کرده‌اند که البته مقدار دقیق آن باید با انجام آزمایش تعیین گردد.

همچنین، طبق جدول (2) مقدار مدول باربرداری حدود 2/4 برابر مدول بارگذاری در تنش 200 کیلوپاسکال بدست آمده است. اغلب مراجع (نظیر [18]) مقدار مدول باربرداری را 3 برابر مدول بارگذاری توصیه کرده‌اند که البته مقدار دقیق این نسبت نیز باید با انجام آزمایش تعیین گردد.

5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر جهت تعیین مدول الاستیسیته در حالت بارگذاری و باربرداری برای ماسه‌ی خشک فاقد ریزدانه از ماسه فیروزکوه 131 استفاده شده و تعداد پنج آزمایش بارگذاری یک بعدی به کمک دستگاه اودنومتر روی این مصالح انجام شده است. از جمله نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1- می‌توان مدول الاستیسیته در شرایط بارگذاری و باربرداری را با انجام آزمایش بارگذاری یک بعدی بدست آورد ولی با توجه به حساسیت مصالح دانه‌ای نسبت به ارتعاش و تأثیر قابل توجه تراکم بر نتایج، باید حداکثر دقت را در نمونه‌سازی مبذول داشت و آزمایش را چندین مرتبه تکرار نمود.

2- مدول الاستیسیته مصالح دانه‌ای مقداری ثابت نبوده و تابعی توانی از تنش قائم اعمالی است. لذا تحلیل‌های صورت گرفته با فرض مدول ثابت، یا در جهت اطمینان بوده، بار اقتصادی پروژه را افزایش می‌دهد و یا خلاف جهت اطمینان بوده، باعث خسارت می‌شود.

3- مقدار مدول اولیه و توان تغییرات مدول با تنش قائم باید با انجام آزمایش تعیین شود و استفاده از مقادیر توصیه شده ممکن است اختلاف قابل توجه با مقدار واقعی داشته باعث تحمیل هزینه یا باعث وقوع خسارت گردد.

4- مدول الاستیسیته در حالت باربرداری بسیار بیشتر از حالت بارگذاری است که دلیل آن افزایش تراکم مصالح می‌باشد. نسبت مدول باربرداری به بارگذاری برای مصالح مرود استفاده در این تحقیق، حدود 2/4 بوده است.

مراجع

- [1] Das, B.M., 2017, *Shallow foundations: bearing capacity and settlement*. CRC press.
- [2] Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsli, B. (1965). "*Veiledning ved lonsning av fundamentering-soppgaver*", Publication No. 16, Norwegian Geotechnical Institute, pp. 30-32.
- [3] Christian, J. T., and Crier, W. D. (1978). "*Janbu, Bjerrum, and Kjaernslis Chart Reinterpreted*", *Advanced Soil Mechanics*, McGraw-Hill, New York.
- [4] Schmertmann, J. H, and Hartman, J. P. (1978). "*Improved strain factor diagrams*", *Journal of the geotechnical engineering division, American Society of Civel Engineering*, Vol. 104, No. GT8, pp. 1131-1135.
- [5] Mthell, J. K., and Gardner, W. S. (1975). "*In situ measurement of volume change characteristics*", *Proceedings, Specialty Conference, American Society of Civil Engineering*, Vol. 2, pp. 279-345.
- [6] Schmertmann, J. H. (1970). "*Static cone to compute settlement over sand*", *Journal of the oil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineering*, Vol. 96, No. SM3, pp. 1011-1043.
- [7] Georgiadis, M., and Butterfield, R. (1988). "*Displacement of footings on sand under eccentric and inclined loads*", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 2, pp. 199-212.

- [8] تبرئی، ع.، ابریشمی، س.، سیدی حسینی‌نیا، ا. و گنجیان، ن. " مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای واقع بر سطح خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید " (1396). مجله علمی پژوهشی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [9] تبرئی، ع. " مطالعه رفتار خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید براساس آزمایش بارگذاری صفحه تناوبی " رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران (1396).
- [10] Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O., Halvae, M., "**Experimental study of a shallow strip footing on geogrid-reinforced sand bed above a void**", Geosynthetics International (2011). 18 (4), 178-195.
- [11] American Society for Testing and Materials. "**Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016)**", ASTM D 422-63, (2007) International, West Conshohocken, PA.
- [12] American Society for Testing and Materials. "**Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass**", ASTM D2216-10, (2010) International, West Conshohocken, PA.
- [13] American Society for Testing and Materials. "**Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**", ASTM D D854-14, (2014) International, West Conshohocken, PA.
- [14] American Society for Testing and Materials. "**Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density**", ASTM D4254-00, (2006) International, West Conshohocken, PA.
- [15] American Society for Testing and Materials. "**Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes**", Unified Soil Classification System, ASTM D2487-11, (2011) International, West Conshohocken, PA.
- [16] Beer & Johnston Ferdinand P. Beer , E. Russell Johnston Jr , John T. DeWolf , David F. Mazurek, 2017, **Mechanics of Materials** , 7th Edition.
- [17] Duncan, J.M., and Chang, C.Y., 1970, "**Nonlinear analysis of stress and strain in soils**", Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.
- [18] Brinkgreve, R.B.J. ed., 2002, **Plaxis: finite element code for soil and rock analyses: 2D-Version 8:[user's guide]**, Balkema.



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
موسسه آموزش عالی فرزنانگان

کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری

۱۶ اسفند ۱۳۹۶ - اصفهان - موسسه آموزش عالی فرزنانگان

کواهی ارائه شفاهی مقاله
ضمن تشکر و قدردانی از ارائه مقاله با عنوان:

تعیین مدول الاستیسته خاک دانه‌های خشک با آزمایش بارگذاری یک بعدی

در کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری
این کواهی به نویسندگان مقاله:

عبداله تبرئی، سعید ابریشمی، سید احسان سیدی حسینی نیا، نوید گنجیان

اعطای گردد. موفقیت روز افزون شما را در پیشرفت علم و فناوری از خداوند متعال خواستاریم.

دکتر شهاب ربانی
دیر علمی کنفرانس
موسسه آموزش عالی فرزنانگان
۱۶ اسفند ۱۳۹۶ - اصفهان