Journal of Building Design and Environment
https://doi.org/10.70401/jbde.2025.0002

Supplementary information

Unraveling barriers to digital twin adoption under Construction 4.0: A DEMATEL-ISM-MICMAC approach

Wenbo Zhao, Kaiyang Wang, Fangyu Guo, Jian Li Hao, Qifeng Zhang, Jing Qi

Table S1. Experts information.

Expert	Gender	Enterprise type	Work experience in the AECO industry	Work experience in the BIM and DT field	Position	Highest education degree
1	Male	State holding enterprise	7 years	7 years	Research and Development Manager	Bachelor
2	Male	Private enterprise	11 years	10 years	Department Head	Master
3	Male	Private enterprise	6 years	6 years	Project Manager	Bachelor
4	Male	Private enterprise	12 years	6 years	BIM Manager	Bachelor
5	Female	BIM consulting company	10 years	6 years	BIM Engineer	Bachelor
6	Male	BIM consulting company	5 years	5 years	BIM Engineer	Bachelor
7	Female	BIM consulting company	3 years	3 years	BIM Engineer	Vocational
8	Male	BIM consulting company	3 years	3 years	BIM Engineer	Vocational
9	Male	BIM consulting company	3 years	3 years	BIM Engineer	Bachelor

Table S2. Direct-influence matrix X.

Barrier	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	**Row sum**
X_1	0	2	2	3	2	2	3	1	2	2	1	1	1	1	3	2	2	30
X_2	2	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	32
X_3	2	2	0	2	3	3	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	31
X_4	3	3	3	0	2	3	2	3	1	3	1	2	2	2	2	2	2	36
X_5	2	2	2	2	0	3	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	22
X_6	1	2	2	1	2	0	2	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	15
X_7	2	2	2	1	2	2	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	20
X_8	2	1	1	1	2	2	2	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	17
X_9	1	1	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1	2	2	2	2	2	22
X_{10}	2	3	2	2	2	2	2	2	2	0	1	1	2	2	2	2	2	31
X_{11}	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	32
X_{12}	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	29
X_{13}	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	0	2	1	1	2	24
X_{14}	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	31
X_{15}	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	0	2	2	30
X_{16}	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	0	2	29
X_{17}	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	0	2	2	2	2	2	0	25
Row sum	31	32	28	27	33	34	33	28	24	25	16	22	26	24	26	24	23	36

Table S3. Normalized matrix N.

Barrier	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_2	0.000	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.056	0.056	0.056	0.056	0.028	0.056	0.028	0.028	0.028	0.028
X_3	0.056	0.000	0.056	0.083	0.083	0.056	0.056	0.028	0.028	0.056	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
X_4	0.083	0.083	0.000	0.056	0.083	0.056	0.083	0.028	0.083	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
X_5	0.056	0.056	0.056	0.000	0.083	0.056	0.056	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.000	0.028	0.028	0.000
X_6	0.056	0.056	0.028	0.056	0.000	0.056	0.028	0.028	0.028	0.000	0.028	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000
X_7	0.056	0.056	0.028	0.056	0.056	0.000	0.056	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.000	0.028	0.028	0.000
X_8	0.028	0.028	0.028	0.056	0.056	0.056	0.000	0.028	0.028	0.000	0.028	0.028	0.028	0.028	0.000	0.000
X_9	0.028	0.028	0.028	0.028	0.056	0.028	0.028	0.000	0.028	0.028	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
X_{10}	0.083	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.000	0.028	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
X_{11}	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.000	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
X_{12}	0.056	0.028	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.028	0.000	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
X_{13}	0.056	0.028	0.028	0.056	0.056	0.056	0.028	0.028	0.056	0.028	0.028	0.000	0.056	0.028	0.028	0.056
X_{14}	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.028	0.056	0.056	0.028	0.028	0.056	0.056	0.056
X_{15}	0.056	0.056	0.056	0.056	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.028	0.056	0.056	0.056	0.000	0.056	0.056
X_{16}	0.056	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.028	0.056	0.056	0.028	0.056	0.056	0.056	0.056	0.000	0.056
X_{17}	0.056	0.028	0.028	0.056	0.028	0.056	0.056	0.028	0.028	0.000	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.000

Table S4. Comprehensive influence matrix T.

Barrier	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	Sum of row
X_1	0.161	0.220	0.204	0.221	0.225	0.232	0.251	0.175	0.176	0.183	0.112	0.140	0.161	0.144	0.210	0.175	0.167	3.158
X_2	0.219	0.173	0.236	0.226	0.258	0.267	0.257	0.205	0.178	0.187	0.141	0.142	0.190	0.146	0.162	0.151	0.142	3.280
X_3	0.215	0.221	0.152	0.197	0.253	0.259	0.228	0.200	0.151	0.158	0.138	0.141	0.186	0.169	0.184	0.173	0.165	3.189
X_4	0.267	0.274	0.255	0.169	0.258	0.290	0.258	0.249	0.173	0.230	0.127	0.184	0.209	0.190	0.207	0.194	0.186	3.721
X_5	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.267

	168	172	162	155	125	209	178	157	114	121	087	105	121	081	119	111	080	
X_6	0.106	0.135	0.129	0.098	0.140	0.092	0.139	0.100	0.086	0.090	0.044	0.079	0.092	0.055	0.064	0.059	0.054	1.564
X_7	0.158	0.161	0.152	0.122	0.167	0.173	0.115	0.148	0.108	0.112	0.083	0.098	0.114	0.075	0.112	0.104	0.073	2.075
X_8	0.141	0.119	0.111	0.106	0.148	0.153	0.149	0.080	0.094	0.098	0.048	0.087	0.098	0.088	0.098	0.066	0.061	1.743
X_9	0.144	0.149	0.135	0.131	0.153	0.182	0.153	0.133	0.091	0.122	0.089	0.111	0.150	0.141	0.149	0.142	0.138	2.313
X_{10}	0.217	0.248	0.207	0.200	0.230	0.237	0.230	0.202	0.179	0.133	0.115	0.142	0.189	0.173	0.187	0.176	0.169	3.232
X_{11}	0.223	0.228	0.210	0.203	0.235	0.242	0.235	0.207	0.184	0.190	0.090	0.172	0.194	0.178	0.193	0.181	0.174	3.339
X_{12}	0.204	0.209	0.168	0.162	0.215	0.221	0.216	0.190	0.170	0.175	0.107	0.106	0.178	0.164	0.177	0.167	0.160	2.990
X_{13}	0.180	0.185	0.147	0.141	0.190	0.195	0.191	0.143	0.125	0.155	0.095	0.116	0.105	0.145	0.131	0.123	0.142	2.510
X_{14}	0.218	0.223	0.207	0.199	0.230	0.237	0.230	0.203	0.180	0.160	0.141	0.170	0.164	0.147	0.189	0.178	0.170	3.247
X_{15}	0.214	0.219	0.202	0.195	0.225	0.207	0.226	0.199	0.177	0.183	0.113	0.165	0.186	0.172	0.133	0.175	0.168	3.157
X_{16}	0.207	0.213	0.172	0.190	0.218	0.225	0.219	0.168	0.172	0.178	0.109	0.161	0.181	0.167	0.180	0.118	0.163	3.042
X_{17}	0.186	0.189	0.150	0.145	0.196	0.175	0.196	0.173	0.130	0.134	0.072	0.146	0.162	0.150	0.162	0.152	0.093	2.610
Sum of column	3.228	3.340	2.999	2.861	3.466	3.594	3.472	2.929	2.489	2.608	1.712	2.265	2.679	2.387	2.658	2.444	2.305	-

Table S5. Global influence matrix H.

Barrier	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_1	1.161	0.220	0.204	0.221	0.225	0.232	0.251	0.175	0.176	0.183	0.112	0.140	0.161	0.144	0.210	0.175	0.167
X_2	0.219	1.173	0.236	0.226	0.258	0.267	0.257	0.205	0.178	0.187	0.141	0.142	0.190	0.146	0.162	0.151	0.142
X_3	0.215	0.221	1.152	0.197	0.253	0.259	0.228	0.200	0.151	0.158	0.138	0.141	0.186	0.169	0.184	0.173	0.165
X_4	0.2	0.2	0.2	1.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1

	67	74	55	69	58	90	58	49	73	30	27	84	09	90	07	94	86
X_5	0.168	0.172	0.162	0.155	1.125	0.209	0.178	0.157	0.114	0.121	0.087	0.105	0.121	0.081	0.119	0.111	0.080
X_6	0.106	0.135	0.129	0.098	0.140	1.092	0.139	0.100	0.086	0.090	0.044	0.079	0.092	0.055	0.064	0.059	0.054
X_7	0.158	0.161	0.152	0.122	0.167	0.173	1.115	0.148	0.108	0.112	0.083	0.098	0.114	0.075	0.112	0.104	0.073
X_8	0.141	0.119	0.111	0.106	0.148	0.153	0.149	1.080	0.094	0.098	0.048	0.087	0.098	0.088	0.098	0.066	0.061
X_9	0.144	0.149	0.135	0.131	0.153	0.182	0.153	0.133	1.091	0.122	0.089	0.111	0.150	0.141	0.149	0.142	0.138
X_{10}	0.217	0.248	0.207	0.200	0.230	0.237	0.230	0.202	0.179	1.133	0.115	0.142	0.189	0.173	0.187	0.176	0.169
X_{11}	0.223	0.228	0.210	0.203	0.235	0.242	0.235	0.207	0.184	0.190	1.090	0.172	0.194	0.178	0.193	0.181	0.174
X_{12}	0.204	0.209	0.168	0.162	0.215	0.221	0.216	0.190	0.170	0.175	0.107	1.106	0.178	0.164	0.177	0.167	0.160
X_{13}	0.180	0.185	0.147	0.141	0.190	0.195	0.191	0.143	0.125	0.155	0.095	0.116	1.105	0.145	0.131	0.123	0.142
X_{14}	0.218	0.223	0.207	0.199	0.230	0.237	0.230	0.203	0.180	0.160	0.141	0.170	0.164	1.147	0.189	0.178	0.170
X_{15}	0.214	0.219	0.202	0.195	0.225	0.207	0.226	0.199	0.177	0.183	0.113	0.165	0.186	0.172	1.133	0.175	0.168
X_{16}	0.207	0.213	0.172	0.190	0.218	0.225	0.219	0.168	0.172	0.178	0.109	0.161	0.181	0.167	0.180	1.118	0.163
X_{17}	0.186	0.189	0.150	0.145	0.196	0.175	0.196	0.173	0.130	0.134	0.072	0.146	0.162	0.150	0.162	0.152	1.093

Table S6. Reachability matrix R.

Barrier	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	**Sum of row**
X_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	14
X_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	13
X_3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	15
X_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	16
X_5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
X_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
X_7	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
X_8	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
X_9	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	5
X_{10}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	15
X_{11}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17
X_{12}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	16
X_{13}	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	7
X_{14}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	16
X_{15}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	16
X_{16}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	16
X_{17}	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	10
Sum of column	14	14	12	11	15	17	15	13	11	11	1	6	13	8	11	11	10	-

Table S7. Hierarchy of barriers that hinder the adoption of DT in the AECO industry.

Barrier	Reachable set	Antecedent set	Common set	Level
X_1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 13, 15, 16, 17	Level 2
X_2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 13, 15, 16	Level 2
X_3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 14, 15, 16	Level 2
X_4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 10, 12, 14, 15, 16	Level 3
X_5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 5, 7	Level 2
X_6	6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	6	Level 1
X_7	1, 2, 3, 5, 6, 7	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 5, 7	Level 2
X_8	6, 8	1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17	8	Level 2
X_9	5, 6, 7, 9, 13	1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16	9	Level 4
X_{10}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 10, 13, 14, 15, 16	Level 3
X_{11}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	11	11	Level 6
X_{12}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17	4, 11, 12, 14, 15, 16	4, 12, 14, 15, 16	Level 5
X_{13}	1, 2, 5, 6, 7, 10, 13	1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 10, 13	Level 3
X_{14}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17	3, 4, 10, 11, 12, 14, 15, 16	3, 4, 10, 12, 14, 15, 16	Level 5
X_{15}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 10, 12, 14, 15, 16, 17	Level 4
X_{16}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 10, 12, 14, 15, 16, 17	Level 4
X_{17}	1, 2, 5, 6, 7, 8, 13, 15, 16, 17	1, 3, 4, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17	1, 15, 16, 17	Level 4