????????

???????? ?????????????? ????????? ?????????? ?????????? ? ????????????? ????????? ????????????? ????????????? ????????? ?????????????????? ??????? ????????????????????? [1]. ?????????? ???????? ? ????????????? ?????????? ?????????? ????????? (????) ???????????? ?????? ??????? ????????? ????????????????? ????????????? ? ????????????? ????????????? - ?????? ????? ? 10-30 ??? ??????? ???????????? ??????? [1]. ?????? ????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ????????, ????????? ????????? ????? ?? ?????? ????? 10% [1].

?????????? ?????? ???????????? ??????? ???????? (DroneSeed, AirSeed, Flash Forest, Dronecoria) ?????? ?????? ???????? ???? ?????????? ?????????. ?????????? ????????? ????????????? ???????? ??????? ?????? ? ?????????? ????????????? ????? ??????? ???????, ???????????? ?????????? Dendra Systems, Flash Forest, AirSeed Technologies ? Ghaf Tree Project.

???????? ????????????? ????????????? ??? ?????????? ?????????, ??????? ????? ?????????? ?? ????????, ???????????? ?? ???????, ? ?????????? ? ?????? ????????????? ???????????? ???????, ??? ????? ????????? ????????? ?????? ????????? [2], ? ????? ?? ??????????-????????? ?????? ???????? ? ???????, ???? ????????? ?????? ?????????? ??????? [3].

??? ????????????? ????????? ???????? ????????????? ???????? ?????????? ????? ? ?????????? ?????? ?????? ???????????? ???????????????? ? DEM-??????. ?????????????? ?????? ????????? ???????? ????????????? ? ??????? ?????????????? ???? ???? ???????? ? ?????? Hou M. ? ??. [6] (??????? 1?), ??? ???????? ?????????????? ?????? ???????? ?????????? ???????? ???????????? ??????? ? ??????? ??????.

???????????? ????? ? ????????? ??????? ???????????? ??????? ????????? ?????? ???????????? Ye X. ? Van Der Meer D. [7], ???????????????????? ?????????? ????????????????????? ? ????????? ??? ????? ??? ????????????? ???????????? ???? ? ?????????? ?? ?? ?????? ????.

?????? ???????????? ??? ????????????? ???????? ????????? ??????? ???????????? ?????? Zhang X. ? ?????????? ??????? [8-10], ? ??????? ?????????????? ?????????? ??????? ?????????? ???????? ? ?????????? ? ??????? ?????????????? ?????????? ?? ???????? ?????, ???? ????????????? ? ??????? ????????????? ???????????? ?????????.

?????? ???????? ??? ???????????? ????????? ????? ? ????? ???????? ???? ????????????? ????????. ???????????? Carvalho D.D. ? ??. [11] ?????????? ????????? ??????? ????????????? ?????????? ????? ? ?????????????? ?????, ??? ?????????? ???????????? ??????? ???????? ?? ?????????? ? ?????????????? ?????????.

?????????? ?????? ?????????? ????????????, ?????????? ??????? ?????????? ????????? (DEM), ????????????? ??????? ?????????? ??????? ??????? ??? ???????? ???????? ???????? ????????????? ? ?????????????? ??????.

? ???????????? Ye X. et al. [12] (??????? 1?) ??????? DEM ?????? ????????? ???? ??????? ? ?????????????? ?????. ?????? ?????????? ????????????? ?????????? ??????? ????????????? ?? ???? ????? ? ???????? ?????????????? ???????? ????????.

?????? Shen W. et al. [13] ????????? ??????? ??????? ????????????? ?????? ? ????????????? ?? ???????? ????? ???????????? ??????? ? ????????? ?????????. ?????? ????????????????, ??? ????????? ???????????? ?????? ????? ????????? ?? 30% ???????? ? ????????????? ????????? ??????? ????????????? (?? 25%).

? ???????????? Liang S. et al. [14] ???????? ??????? ????????? ???????? ? ?????????? ??????? ??? ????? ????????? ? ?????????????? ????????. ???????????, ??? ?? 60% ????????? ???????????? ??????? ???????????? ?? ???? ?????? ??? ?????? ????? ?????????.

???????????? ??????? ???????????? ?????? Zhang X. et al. [15], ? ??????? ?????????? ??????? ????? ?????? ?? ???????? ???????? ?????????????. ????????, ??? ????????????? ????????????? ?????? ? ????????????? ????????? ????? ????? ????????????? ???????????????? ??????.

?????? ???????????? ???????? DEM ???????? ?????????? ????????? ???????, ??? ????????????????? ? ?????? Lin J. et al. [16]. ?????? ???????????? CFD-DEM ?????? ??? ????????????? ????????????? ??????? ? ?????????? ????????? ????????????????? ????.

???????????? Wada K. et al. [17] ????????????? ?????????? DEM ??? ????????????? ???????????????? ?????? (100-900 ?/?) ? ????????????????????. ? ?????? Ghazi Alshanti W. [18] ??????? ????????????? ???????????? ??????? ? ????????????????? ???????.

???????????? Sunday C. ? ?????. [19, 20] ???????????? ????????????????? ?????? ??????? ????????????? ??????? ?? ???????? ???????? ????????????????? ? ????????????????? ??????. ? ?????? [19] ????????? ????????????? ???????????? ????????????????????? ????????? ?????????? ?????? ?????????? ????????? (DEM) ??? ????????????? ??????? ????????? ? ???????? ????????? ??????????. ? ???????????? [20] ?????????? ????????????????? ?????? ???????????? ??? ????????? ??????????????, ?????????? ????????????????? ???????.

???????????? Ye X. ? Zhang C. [21] ????????? ??????? ??????? ????????? ????????? ?? ??????? ?????????? ? ????????????? ???????? ????????????????? ???? ??? ??????? ?????????????. ?????? ???????, ??? ? ????????????????? ?????? ???? ???????????? ?? ??????? ?? ???????? ? ????? ???? ??????? ????? ?????????? ?????? ?????????? ??????, ?????????? ??????? ????????.

?????? Wang F. ? ?????. [22] ???????????? ?????????? ???????????? ?????? ???? ????????????? ??? ???????????? ????????????? ? ????????????????? ?????, ?????????? ?? ????????????????? ????????????? DEM-????????????? ? ???????????????????? ??????. ???????????? ?????? ???????? ????????? ???? ????? ???????? ??????????, ??? ????? ??????? ????? ?????????, ???????? ??????????, ??????? ?????? ????????????????? ????? ? ?????????? ?????? ????? ????. ?????????? ?????? ??????, ??? ?????????? ???????????? ???????????? ?????? ???????????? ???????? ??? ???????? ????????? ???????? ????????????????? ????????????? ????? ? ????????? ?????? ??-?? ???????????? ???????? ? ????????? ????, ?????????? ? ??????? ??????????????.

??????? 1. ?????? ???????????? ????????? ????????

?????????????? ???????? ? ?????????? ??????
Figure 1. Methods for studying the processes of impact interaction of objects with a discrete medium
????????: ? – Hou M. ? ??. [6], ? – ?????????? ????????????? ???????
Source: A – Hou M. et al. [6], B – authors' own modeling results

????? ???????, ?????????? ??????????? ? ????????????????? ???????????? ???????? ????????????? ????????????? ????? ? ?????????? ???????.
????? ??????? ???????????? ???????? ?????????? ? ????????? ??????????? ???????? ??????? ?????? ??? ???????? ????????????? ?????? ????? ? ????, ? ????? ???????? ??? ??????? ??????? ??? ??????????? ?????????? ???????????? ??????????? ?????.
????????? ? ??????
???????? ???????????? ???????? ????????????? ?????????? ??????? ??????? ?????? ??? ???????? ?????? ????? ? ????.
? ?????? ?????? ????????????? ????????????? 3D-?????? ??????????? ???????? ??????? ?????? ????????????? ????? ? ?????????? ??????? ??????? (??????? 2), ??????? ??????? ?? ????????????? ?????? 1, ??????? 2, ?????? ??????? 3, ????????? 4, ????????? ???? 5, ????????? ??????? 6, ???????? ????????? ??????? 7, ??????????? ???????? 8, ?????????? 9, ??????? ????????? 10, ?????????? ????????????? 11, ??????????? ??????? 12 ? ?????????? ??????? 13. 3D-?????? ??????????? ????????????? ??? ???????? ???????????????? ? ????????????? 3D-??????, ??? ????????? ? ?????????? ????? ????????? ????????????? ????????? ?? ?????????? ?????????? ?????????? ? ???????????? ????????? ???????????????? [5].
??????????? ?????, ????????? ??? ???????????? ????????? ????????????? ????????????? ?????? ? ????????? ??????, ???????????? ????? ???????? ?????????? ?????? ???????? 100?100?50 ?? (??????? 3). ????????? ?????? ?????????? 2500 ??/?^{3} ??? ????????????? ????????? ??????? ???? ?????, ????? ??????? ????? 0,011 ?, ??????? 2 ??. ?????????? ???????? ?????????? ?????? ???????? 64547 ?????? ????? ?????? 0,676 ?? ? ???????? ????????? 1352 ??/?^{3} ??? ????????????? ????????? ?????? ????.
??????????? ???????? (????? ?? ?????? ????????????? ????) ????????? 6 ?? ???????????? ?? ?????? ?????????? ?????? ?? ?????? 200 ?? ?? ??? ???????????. ????????? ????????????? ?????? ??????? ?????? 1900 ??/?^{3} ??? ????????????? ??????????? ????????? ????????????? ??????, ???????????????? ? ?????? ?????? ???????? ?????? ? ????? ?????.

??????? 2. ?????????? ??????? ??????? ?????? ? ?????????? ????????????? ????? ??????? ???????
Figure 2. Precision seeding device with acceleration of pelleted seeds by an air flow
????????: ??????????? 3D-?????? ??????? | Source: authors' own 3D model

??????? 3. ??????????? ????? ??? ???????????? ????????? ????????????? ?????? ? ????????? ?????
Figure 3. Virtual test bench for studying the introduction of pelleted seed into the soil layer
????????: ??????????? ?????????? ???????| Source: authors' own composition

? ??????? 1 ???????????? ???????? ????????? DEM-?????? ??????????? ????????????? ???????? ?????????, ????????????? ? ??????? ????. ??? ??????????? ???? ?????????? ???? ??????? ???????? ????????? ????????? (c_n) ???????????? ??? ????????????????? ????? ????. ????? ??? ?????????? ???????????? ????????? (kzh) ????????? ????? ?????????? t_s ??????????? ??? ????????? ????????? ????????? ????????? ?

??????????? ????????????? (k_{damp}) ??? ??????????? ???????????? ???????.
???????? ?????????? ????????? ??? ????????? ??????? ??? (F^Y) ? ??? ?????? ? ??????? ?????? ($F^?$? $F^?$) ????????????? ?? ??????? ???????????? ???????? (??????? 4). ????????????? ???????????? ? ?????????? ?????????? ???????????? (x, y, z). ????????? ??????? ???????? E_i ???????? ?????? ???????????: ???????????? ??? ?????? (x_i, y_i, z_i) ? ???????????? ???????? (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}). ????? ????????? ???????? ????????????? ?????? ?????????? ? ?????? ?????? ??????? [24].

??????? 1.
????????? DEM-??????

??? ?????	????? ??????????, t s	??????????? ????????????? k_{damp}, ?·?/?	??????????? ????????? kzh, ?/?	?????????? ???????? ????????? c_n, ???
?????????	1,05	30	6,0 ? 10^4	0
?????????????	1,12	40	6,0 ? 10^4	15000
???????	1,18	50	6,0 ? 10^4	30000

??????? 4. ????? ???????? ???????? ?????????? ?????????:
? – ??????? ???? ?????????? ?????????; ? – ??????? ??????????? ???????? ? ??????? ???????????
Figure 4. Diagrams of force contact of discrete elements
A – contact of two discrete elements; B – contact of a discrete element and a solid surface
????????: ??????????? ?????????? ???????| Source: authors' own composition

?????????? ???????? ????????????? ???????????? ? ????????????? ???????? ????????????? ???? ????????? ???????? ??????. ????? ???? ????????????? ??????? ????????, ??????? ????????? ? 1?/? ? ?????, ??????? ???????? – ????????????? ???????? (??????? 5, ?). ???????? ?????????? ???????????? ? ??????????? ????? ? ?????????-???????????? ?????????, ?????????? ????? ??? ???????? ??????? (??????? 5, ?).

? ???????? ????????????? ?????????? ??????? ????????????? ????????????? ?????? ? ??? ???????? ? ????????????? ????????? ? ?????? ???????. ??? ???? ??????? ?????????????

????????????? ?? ?????? ????? ??????. ????? ?????????? ?????????? ??????? ???????. ??? ??????????? ???????????? ???????? ????????????? ????????????? ????? ? ????????? ?????? ?? ?????? ????????????? ????? (??????? 6). ?? ??????? ?? ????????? 1 ? ???????????? ????????? ?????? ? ??????, ?????????? ?????????? ? ?????????? ?????????? ???? ?????????? ?? ????????? 2, ?????????? ???????? 3, ????????? ??? ???????? ???????? 4, ?????????? 5, ?????? ??? ?????????? ?????? 6, ??????? ??? ????? 7.

??????? 5. ?????????? ???????? ?????????????:
? – ???????? ????????????? ?????; ? – ??????????? ????
Figure 5. Monitoring the modeling process:
A – color surface diagrams; B – central section
????????: ??????????? ?????????? ???????| Source: authors' own composition

??? ????????? ???????? ????????????? ????????? WoSporT WST-X01. ?? ????????? ??????????? ??????? ????????? 0,01-20 ??, ? ???????? ?? 120 ??/?, ???????? ?????????? ????????? 0-800 ?/? ??? ??????????? ?? 0,3 %. ??? ?????? ???????? ??????????? USB ?????? ?? ????????? ?????? 260 fps. ?????? ????????????? ?????? ????????? 5,95?? ? ????? 0,22 ? ????????????? ????????????? ????????? ???????????. ???????? ?????? ????????????? ???????? ????????? ??????? ???????????.

??????? 6. ???????????? ?????
Figure 6. Laboratory stand
????????: ??????????? ?????????? ???????| Source: authors' own composition

??? ?????????? ????? ????????????? ????????? ???????? ?????, ?????? ???????????????? ? ??????? ??????????? ???????????????? (??????? 7). ???????????????????? ?????? ???????? ??? ???????? ???? ???????? ????? ??????????? ???????: ????? 0,063…2 ?? ?? 70% ?? 95%; ???? 0,002…0,063 ?? ?? 5 ?? 25%; ????? < 0,002 ?? ????? 5%. ????????? ????? 10 % ?? ?????.
??????????? ????????????? ??????? ? ???????? ???????? ??????. ? ?????? ??????????? ????? ?????????, ? ??????? ??? ?????????? ????????? ??????? ????????????? ?????????? ????? ????????? ????????? ? ???????? ?? ????? 50 ??.
??? ???????? ?????????? ???????????? ???????? ? ?????? ????????????? ?????? ?????????? ????????????????. ????????? ???????? ??????? ? ??????? ????? ??????????? ? ?????????????? ?????? ????????????????? ??, ???????????? ?? ??????? ?????. ??? ????????? ?????? ????????????? ?????????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????????? ??-1, ?????????????? ??????? ???????????? ?? ?????? ????????????????????. ??????? ????????? ??????? ??????? ? ???? ????????????????????? ???????????? ? ??????????? ??????? ????????, ? ????? ?????????? ????????? ???????????? ?????????????? ?????? ? ???????? ??????? ?????????????.
??????????? ???????? ?????? ??? ???????? ???????????? ?????? ??????????? ???????? ?????????????? ?????????? ???????? ???????? ???????? ????????? ??????????? ????????.
? ???????? ?????????? ???????????? ?????? ??? ?????? ??????????? ???????? (CV). ????? ???????? ?????? ??? ???????????? ? ???????????? ???????????? ???????? ?????? ??????????????, ?????????????? ?? ?????????? CV ????? 10%.

??????? 7. ???????????? ????????????? ???????????? ????????? ? ?????
Figure 7. Study of penetration of a spherical indenter into soil

????????: ??????????? ???? ???????| Source: authors' own photo