

# ČISTIJI ZRAK ZA BOLJE UČENJE

OPTIMIZACIJA TEHNOLOGIJA PREČIŠĆAVANJA ZRAKA U  
UČIONICAMA KROZ MJERENJA I CFD SIMULACIJE

# Zašto govorimo o kvalitetu zraka u učionicama?

Djeca su posebno osjetljiva na zagađen zrak jer dišu brže od odraslih i često kroz usta, čime udišu veću količinu zagađenog zraka. Njihov respiratorni i imunološki sistem još su u razvoju, što ih čini ranjivijima na štetne čestice i gasove. Budući da značajan dio dana provode u školskim prostorijama, kvalitet zraka u učionicama neposredno utiče na njihovo zdravlje, koncentraciju i sposobnost učenja. Ipak, učionice su često pretrpane i nedovoljno prozračene, dok dodatni izvori zagađenosti potiču od sredstava za čišćenje, namještaja i plijesni. Osiguravanje čistog i svježeg zraka u školama predstavlja ulaganje u zdravlje i razvoj djece.



**PM2.5 čestice** – mikroskopske čestice prašine i dima – spadaju među najopasnije zagađujuće materije jer mogu prodrijeti duboko u pluća i krvotok, povećavajući rizik od respiratornih i kardiovaskularnih bolesti.

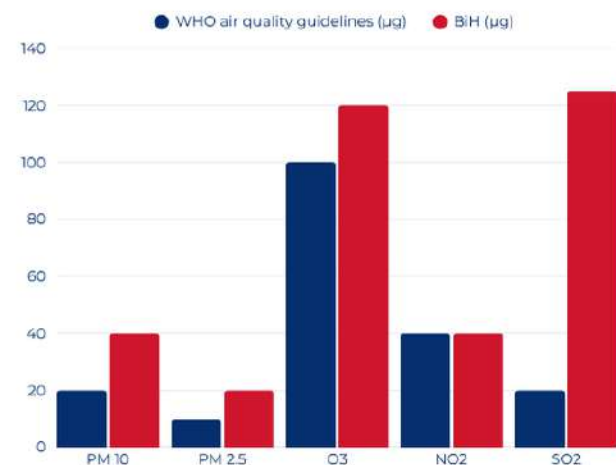


**Sarajevo** se redovno svrstava među **najzagađenije gradove** na svijetu **tokom zime**, kada koncentracije PM2.5 čestica dostižu vrijednosti i do pet puta veće od preporuka Svjetske zdravstvene organizacije.



**Geografski položaj grada** dodatno pogoršava situaciju jer zbog kotlinskog položaja i čestih temperaturnih inverzija zagađeni zrak ostaje zarobljen pri tlu, što povećava izloženost stanovništva, posebno djece.

Kvalitet zraka u BiH u odnosu na preporuke WHO-a



Izvor: Factsheet on air quality in Bosnia and Herzegovina

# Šta smo istraživali?

U projektu smo ispitivali **efikasnost prečišćivača zraka** u učionici kroz:

- Eksperimentalna mjerenja pomoću PM2.5 senzora
- Kompjuterske simulacije putem računske dinamike fluida (engl. CFD – Computational Fluid Dynamics)



Cilj projekta je bio pronaći **najefikasniji način postavljanja i korištenja prečišćivača** kako bi se osigurao čist zrak tokom kritičnih epizoda zagađenosti.

**Tabela 1:** Indeks kvaliteta zraka na osnovu koncentracije PM2.5 čestica prema US EPA 2024 standardu.

AQI kategorija	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Utjecaj na zdravlje
<b>Dobro</b>	0 – 9.0	Minimalan.
<b>Umjereno</b>	9.1 – 35.4	Manje smetnje pri disanju kod osjetljivih osoba.
<b>Nezdravo za osjetljive skupine</b>	35.5 – 55.4	Smetnje pri disanju kod djece, starijih i osoba sa bolestima disajnog sistema.
<b>Nezdravo</b>	55.5 – 125.4	Smetnje pri disanju kod svih osoba.
<b>Vrlo nezdravo</b>	125.5 – 225.4	Izaziva bolesti disajnog sistema pri dužem izlaganju.
<b>Opasno</b>	$\geq 225.5$	Značajan i kod najmanje fizičke aktivnosti. Ozbiljan utjecaj na ljude sa bolestima srca i disajnog sistema.




# Kako smo mjerili kvalitet zraka?

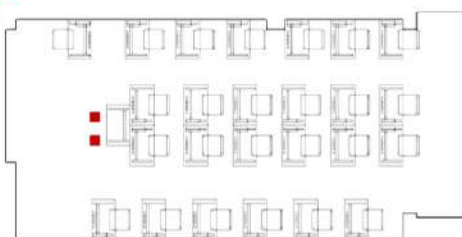
- ❏ Eksperimenti su izvedeni u učionici dimenzija  $13,6 \times 6,8 \times 3,5$  m, koja je opremljena sa 25 stolova i stolica, pri čemu je svaki radni prostor imao računar i monitor.
- ❏ U učionici je postavljeno pet PM2.5 senzora na različite lokacije, uključujući zidove, stolove i prostor ispod stolova.
- ❏ Učionica je napunjena PM2.5 česticama pomoću vještački generisanog dima do koncentracije  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Slika 1:** Digitalni model učionice korištene u eksperimentima i kompjuterskim simulacijama.

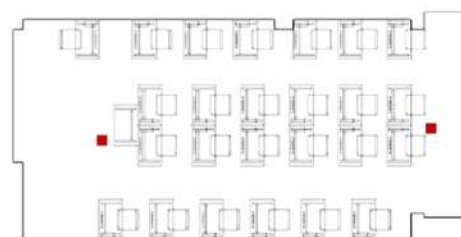
# Kako smo testirali prečišćavanje zraka u učionici?

-  Nakon što je koncentracija dostigla stabilnu vrijednost, uključeni su prečišćivači zraka.
-  Tokom dva sata senzori su kontinuirano pratili smanjenje koncentracije PM2.5 čestica.
-  Ispitivano je 6 različitih scenarija sa različitim brojem prečišćivača, njihovim rasporedom i protokom zraka.



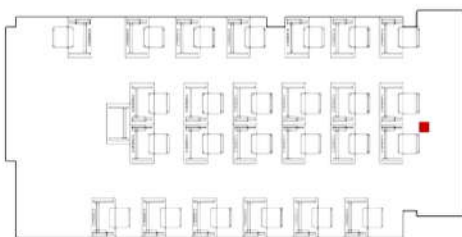
**Scenario 1**

 2x  
 350 m<sup>3</sup>/h (srednji nivo brzine)



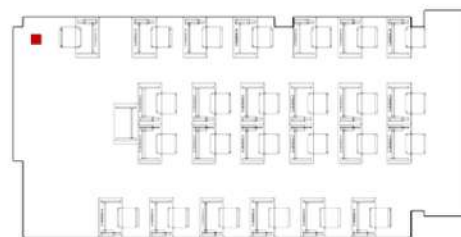
**Scenario 2**

 2x  
 350 m<sup>3</sup>/h (srednji nivo brzine)



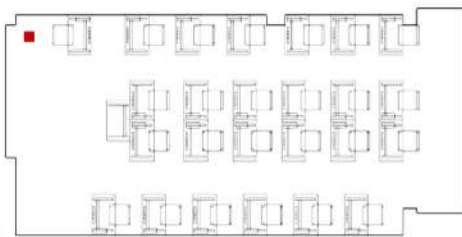
**Scenario 3**

 1x  
 350 m<sup>3</sup>/h (srednji nivo brzine)



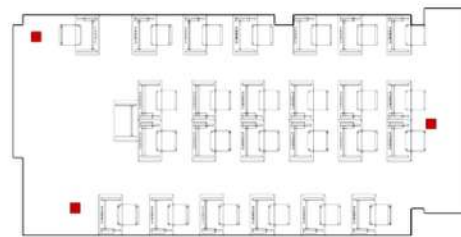
**Scenario 4**

 1x  
 350 m<sup>3</sup>/h (srednji nivo brzine)



**Scenario 5**




 1x  
 600 m<sup>3</sup>/h (srednji nivo brzine)

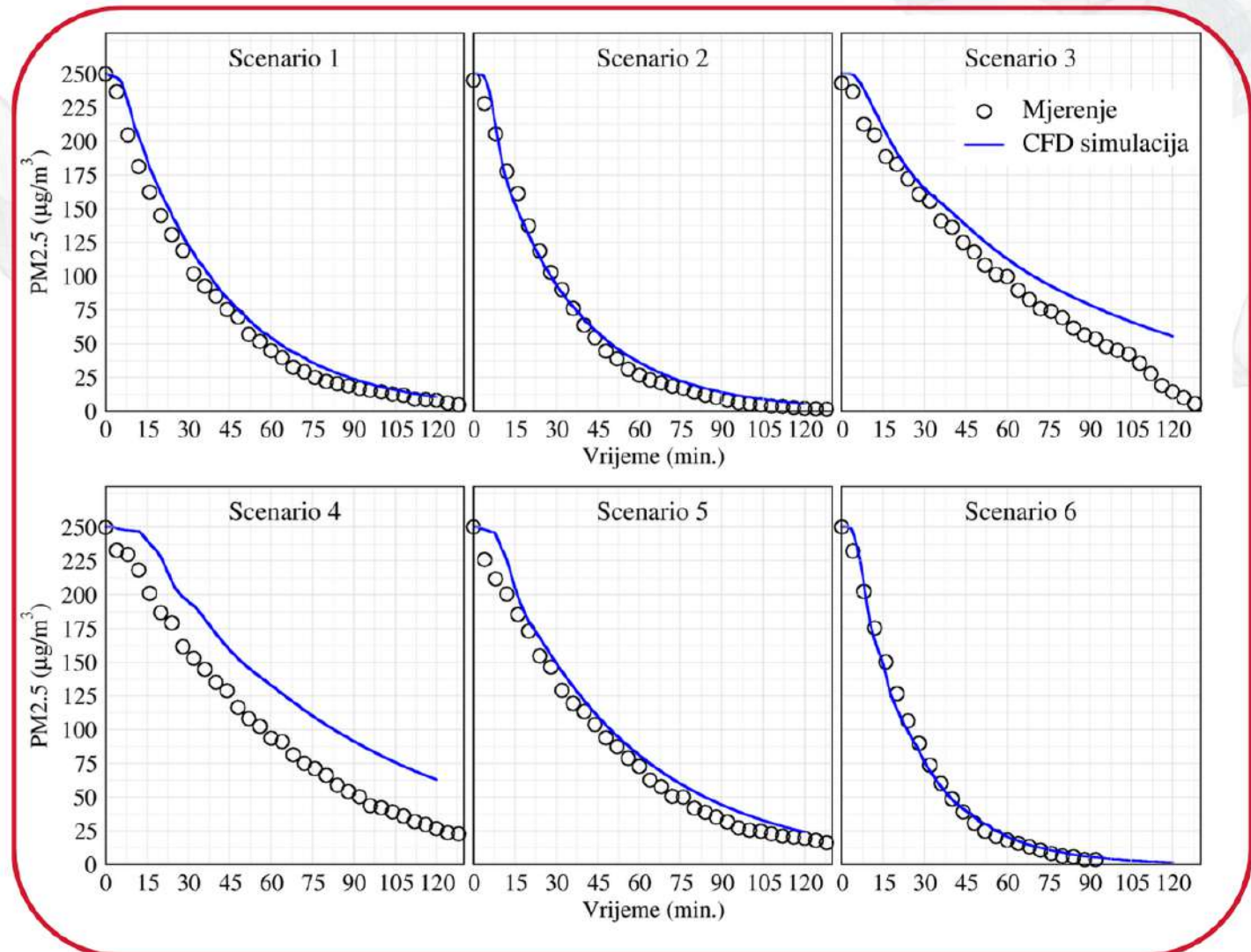


**Scenario 6**

 3x  
 350 m<sup>3</sup>/h (srednji nivo brzine)

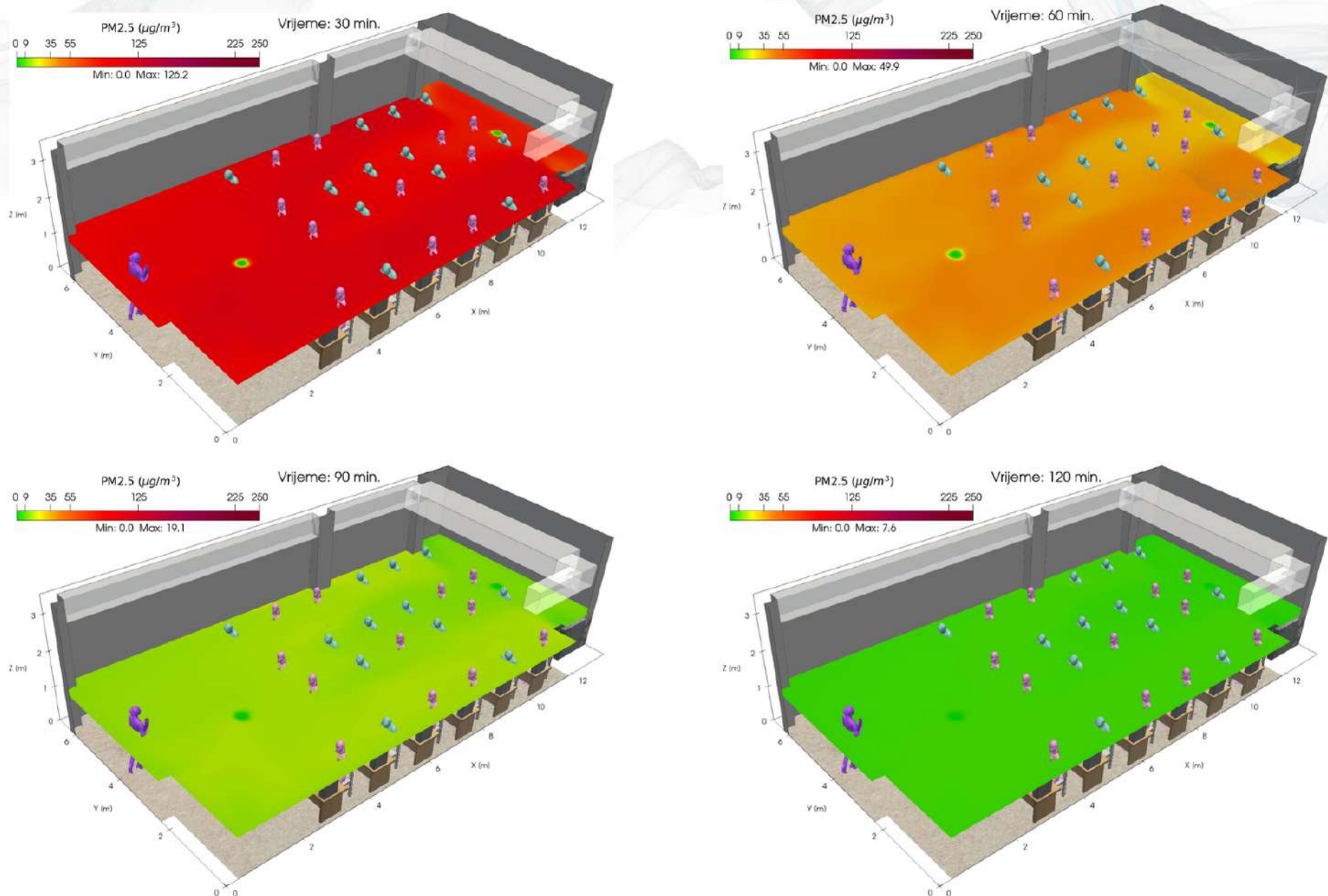
# Poređenje rezultata mjerenja sa CFD simulacijama

-  Kreiran je CFD model učionice da bi se rekonstruisala eksperimentalna mjerenja.
-  Simulacije su pokazale dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, čime je potvrđena pouzdanost CFD metode.
-  Na osnovu simulacija su izdvojeni podaci o prosječnoj koncentraciji PM2.5 na visini od 1,15 m, prosječnoj koncentraciji u cijeloj učionici, i brzini zraka u presjeku na visini od 1,15 m.



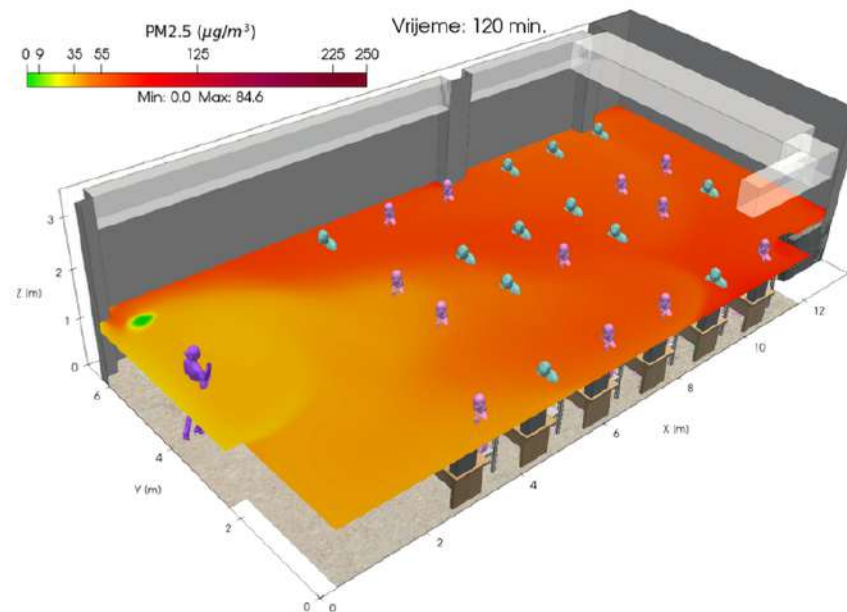
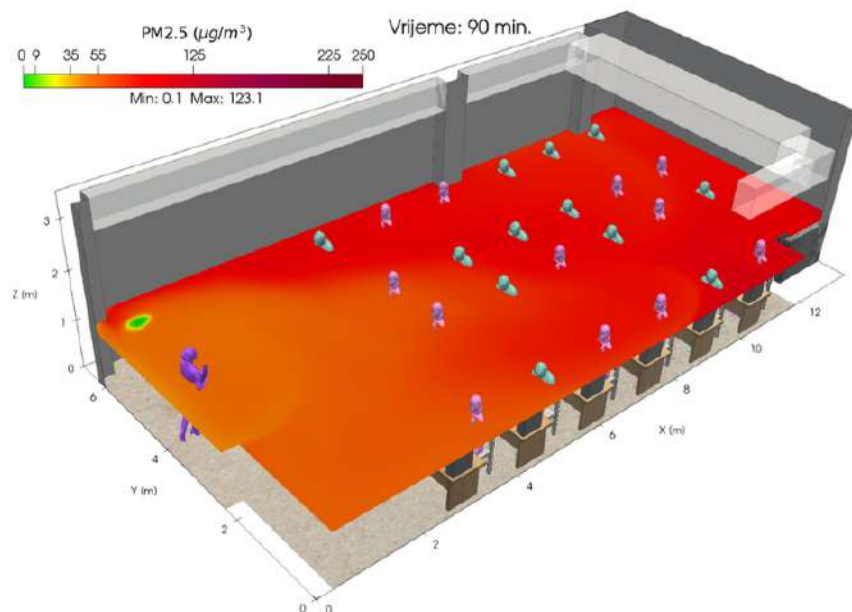
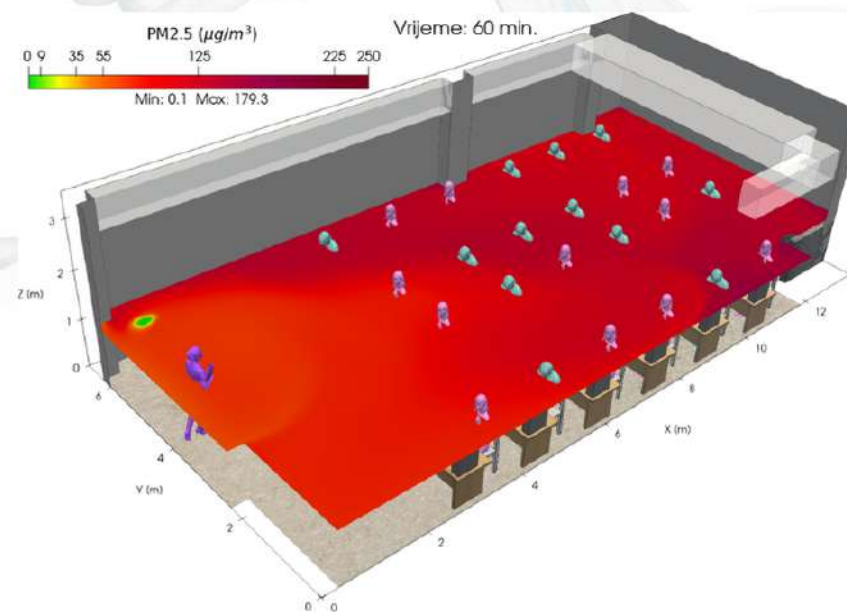
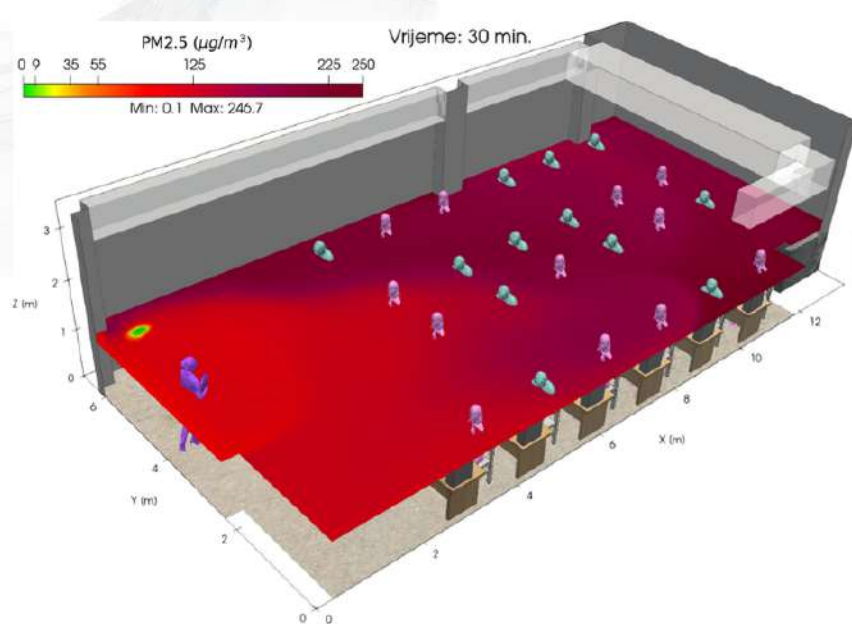
**Slika 2:** Validacija kompjuterskog modela i metodologije – poređenje eksperimentalnih mjerenja sa rezultatima CFD simulacija.

# Rezultati simulacija za scenarij sa dva prečišćivača



Slika 3: Koncentracija PM2.5 čestica u horizontalnom presjeku na visini 115 cm nakon 30, 60, 90 i 120 minuta u scenariju sa dva prečišćivača zraka.

# Rezultati simulacija za scenarij sa **jednim prečišćivačem**



**Slika 4:** Koncentracija PM2.5 čestica u horizontalnom presjeku na visini 115 cm nakon 30, 60, 90 i 120 minuta u scenariju sa jednim prečišćivačem zraka.

# Efikasnost prečišćivača u učionici

## Tri prečišćivača - najčistiji zrak

Kada u učionici istovremeno rade tri uređaja (Scenario 6), zrak se najbrže prečišćava. Već nakon 60 minuta koncentracija PM2.5 smanjuje se na svega 18,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (7,4% početne vrijednosti), dok nakon 120 minuta gotovo potpuno nestaje – svega 1,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Granična vrijednost od 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dostiže se već nakon 45 minuta, što znači da učenici vrlo brzo udišu znatno čišći i zdraviji zrak.

## Dva prečišćivača – efikasno i stabilno rješenje

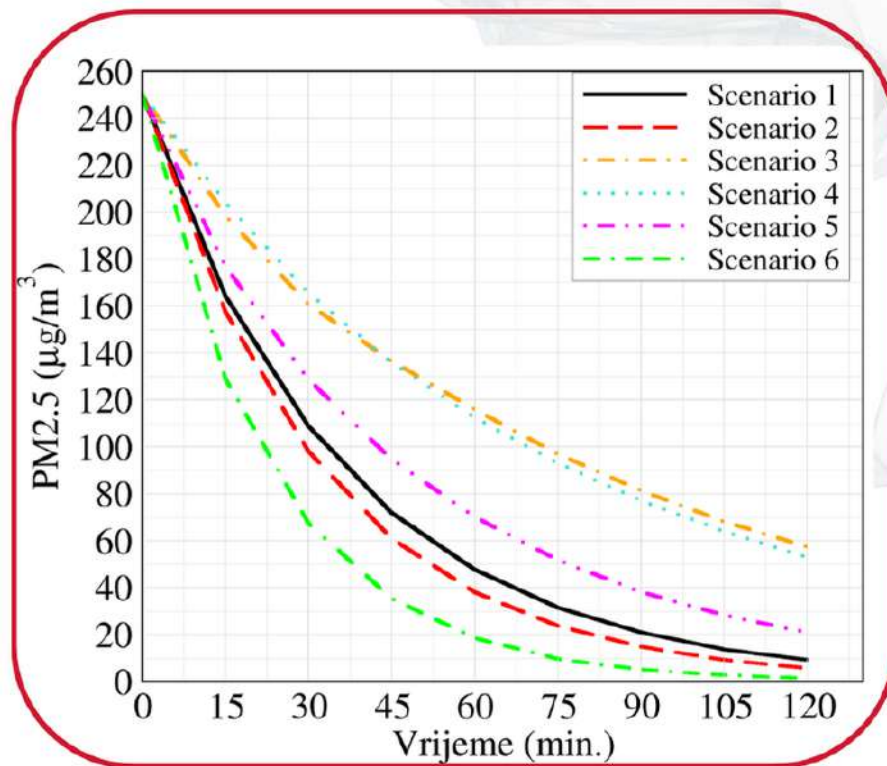
Dva uređaja također postižu vrlo dobre rezultate. Ipak, raspored je ključan: kada su oba smještena u donjem dijelu učionice (Sc. 1), poslije 60 minuta koncentracija PM2.5 smanjuje se na 47,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (19%), a nakon 120 minuta na 9,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Još bolji efekat postiže se kombinovanim rasporedom (jedan u gornjem, a drugi u donjem dijelu, Sc. 2): nakon 60 minuta koncentracija iznosi 37,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (15%), a nakon 120 minuta svega 5,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . U ovom slučaju, granična vrijednost od 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dostiže se nakon 65 minuta.

## Jedan prečišćivač – presporo čišćenje

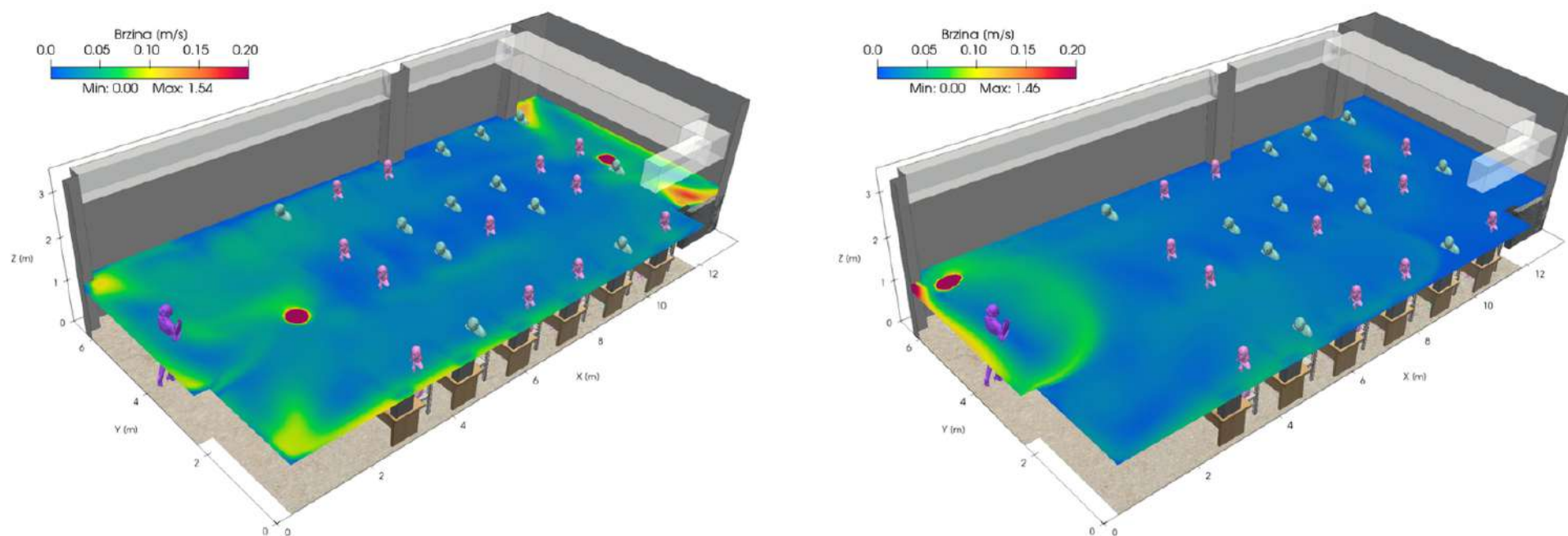
Kada radi samo jedan uređaj, prečišćavanje zraka u učionici odvija se znatno sporije. Nakon 60 minuta koncentracija PM2.5 i dalje je visoka (112–115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , oko 45% početne vrijednosti), dok se nakon 120 minuta smanjuje tek na 53–57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (22%). Takav nivo i dalje spada u kategoriju „Nezdravo za osjetljive grupe”.

Povećanjem brzine ventilatora na maksimalni nivo (Sc. 5), situacija se značajno poboljšava: nakon 60 minuta koncentracija se smanjuje na 69,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a nakon 120 minuta na 20,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . To predstavlja oko 38% brže prečišćavanje tokom prvog sata, ali je i dalje manje efikasno od rješenja sa dva uređaja na srednjoj brzini.



# Da li prečišćivači stvaraju **propuh**?

- ✓ Ispitali smo kako mlaz zraka iz prečišćivača utiče na osjećaj udobnost u učionici.
- ✓ Rezultati pokazuju da brzine zraka ostaju niske i ugodne, sa vrijednostima brzina ispod 0,2 m/s, **bez stvaranja neugodnog propuha**.
- ✓ Lagano strujanje zraka pomaže u ravnomjernom miješanju zraka i efikasnijem prečišćavanju.



**Slika 6:** Brzina strujanja zraka pri radu prečišćivača na srednjoj brzini rada (lijevo) i maksimalnoj brzini rada (desno).

# Šta smo naučili?



**Tri** prečišćivača predstavljaju **najefikasnije rješenje**, jer omogućavaju skoro potpuno pročišćavanje zraka za manje od dva sata.

**Dva** prečišćivača su također **dovoljno efikasna**, ali je njihov raspored presudan: kombinovani položaj (dolje + gore) bolji je od grupisanog.

**Jedan** prečišćivač **nije dovoljan** za ovako veliku učionicu. Čak i pri visokoj brzini rada, koncentracije PM2.5 ostaju višestruko veće od onih kod dva ili tri uređaja.

**Raspored i strujanje zraka** imaju gotovo jednako **važan uticaj** kao i broj uređaja – loše pozicioniranje može prepoloviti efikasnost.

Za tipične učionice ovih dimenzija, **optimalna konfiguracija** je **najmanje dva** prečišćivača na različitim lokacijama, a **tri uređaja** daju **najbolji rezultat**.

**Projekat "Optimizacija tehnologija prečišćavanja zraka u učionicama kroz mjerenja i CFD simulacije" se realizuje u okviru R&D grant šeme, koju zajednički finansiraju Federalno ministarstvo obrazovanja i nauke i Razvojni program Ujedinjenih nacija (UNDP) u Bosni Hercegovini kroz projekat „Boljom upravom do bržeg ekonomskog rasta (EGG2)“, finansiran od strane Vlade Kraljevine Norveške i program “Prevođenje Okvira za realizaciju Ciljeva održivog razvoja u BiH u održivi i inkluzivni rast (SDG2BIH)” koji finansira Švedska.**

**Kontakti: [info@ius.edu.ba](mailto:info@ius.edu.ba), [info@enova.ba](mailto:info@enova.ba), [office@invento-pro.ba](mailto:office@invento-pro.ba)**

