ОРТОДОНТІЯ

УДК 616.314.1:004.8
DOI https://doi.org/10.35220/2523-420X/2026.3.11

М.Ю. Гончарук-Хомин,
доктор філософії, доцент,
доцент кафедри терапевтичної стоматології,
Державний вищий навчальний заклад
«Ужгородський національний університет»,
вул. Університетська, 16а, м. Ужгород, Україна,
індекс 88000, myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-7482-3881

С.С. Горзов,
старший викладач кафедри дитячої стоматології,
Державний вищий навчальний заклад
«Ужгородський національний університет»,
вул. Університетська, 16а, м. Ужгород, Україна,
індекс 88000, semen.horzov@uzhnu.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-9332-8106

ВПЛИВ ШТУЧНО СФОРМОВАНИХ ДЕФЕКТІВ ІНТРАОРАЛЬНИХ СКАНІВ НА ЯКІСТЬ АВТОМАТИЧНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ У ПАЦІЄНТІВ ЗІ СКУПЧЕНІСТЮ ЗУБІВ У ФРОНТАЛЬНІЙ ДІЛЯНЦІ

Мета дослідження. *Оцінити вплив локалізації штучно сформованих дефектів поверхні інтраоральних сканів на якість автоматичної сегментації цифрових моделей у пацієнтів зі скупченістю зубів у фронтальній ділянці.* ***Матеріали та методи.*** *До дослідження було включено 18 анонімізованих інтраоральних сканів нижньої щелепи пацієнтів зі скупченістю зубів у фронтальній ділянці. Для кожного вихідного скану формували чотири цифрові досліджувані сценарії: вихідний скан без додаткових змін; скан із локальним дефектом вестибулярної поверхні; скан із дефектом контактної поверхні без поширення на візуальну лінію розмежування між сусідніми зубами; скан із дефектом контактної поверхні, який поширювався через візуальну лінію розмежування між сусідніми зубами. Штучне формування дефектів проводили у програмному середовищі Medit Design шляхом локального видалення фрагментів полігональної сітки. Автоматичну сегментацію виконували у програмному середовищі Medit Ortho Simulation.* ***Результати.*** *Критичні порушення автоматизованої сегментації були зареєстровані у 4 із 18 вихідних сканів без штучно сформованих дефектів поверхні (22,22%), у 5 із 18 сканів із дефектом на вестибулярній поверхні (27,78%), у 8 із 18 сканів (44,44%) із дефектом на контактній поверхні без поширення на візуальну лінію розмежування між сусідніми зубами, та у 15 із 18 сканів (83,33%), в яких дефект поверхні поширювався через візуальну лінію розмежування між двома сусідніми зубами. Найбільш характерними порушеннями в останній групі були зміщення або втрата частини межі сегментації, часткове графічне об'єднання сусідніх зубів, фрагментація сегмента окремого зуба та помилки автоматичного маркування. Частота дефектів сегментації статистично значуще відрізнялася між чотирма умовами (критерій Кохрена $Q=24,67$; $p < 0,001$).* ***Висновки.*** *Локалізація дефекту цифрової поверхні відносно візуальної межі між сусідніми зубами є більш значущим фактором для якості автоматичної сегментації, ніж сам факт наявності локальної втрати даних. Дефекти вестибулярної поверхні характеризувалися мінімальним впливом, тоді як поширення дефекту на проекцію візуальної лінії розмежування двох сусідніх зубів суттєво підвищувало ризик критичних помилок сегментації.*

Ключові слова: *інтраоральний сканер, цифровий відбиток, сегментація зубів, штучний інтелект, скупченість зубів, дефекти сканування, ортодонтія, цифрова модель*

M.Yu. Goncharuk-Khomyn,
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Restorative Dentistry,
State High Educational Institution «Uzhhorod National University»,
16a Universitetska street, Uzhhorod, Ukraine, postal code 88000,
myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-7482-3881

S.S. Horzov,
PhD-student,
Senior Lecturer at the Department of Pediatric Dentistry,
State High Educational Institution «Uzhhorod National University»,
16a Universitetska street, Uzhhorod, Ukraine, postal code 88000, semen.horzov@uzhnu.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-9332-8106

INFLUENCE OF ARTIFICIALLY GENERATED INTRAORAL SCAN DEFECTS ON THE QUALITY OF AUTOMATED TOOTH SEGMENTATION IN PATIENTS WITH ANTERIOR DENTAL CROWDING

Purpose of the study. *To evaluate the influence of the localization of artificially generated digital-surface defects within intraoral scans on the quality of automated segmentation of digital models in patients with anterior dental crowding.* ***Research methods.*** *Eighteen anonymized mandibular intraoral scans obtained from patients with anterior dental crowding were included. Four digital investigation conditions were generated*

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

© М.Ю. Гончарук-Хомин, С.С. Горзов, 2026

for each original scan: intact scan data (no graphical defects present); localized vestibular-surface defect; proximal-surface defect not involving the visual inter-tooth demarcation line; proximal-surface defect extending across the visual demarcation line between adjacent teeth. Artificial defects were generated in the Medit Design software environment by local deletion of polygonal mesh fragments. Automated segmentation was performed using Medit Ortho Simulation. ***Results.*** *Automated segmentation defects were registered in 4 of 18 intact scans (22,22%), 5 of 18 scans with vestibular defects (27,78%), 8 of 18 scans with proximal defects not crossing the inter-tooth visual boundary (44,44%), and 15 of 18 scans in which the defect extended across the visual inter-tooth demarcation line (83,33%). The most characteristic errors in the latter condition were displacement or loss of part of the segmentation boundary, partial fusion of adjacent tooth segments, fragmentation of an individual tooth segment, and incorrect automated labeling. The frequency of segmentation defects differed significantly across the four conditions (Cochran Q=24.67; p < 0,001).* ***Conclusions.*** *The localization of a digital-surface defect relative to the boundary between adjacent teeth appears to be more important for automated segmentation quality than the mere presence of localized data loss itself. Vestibular defects had a limited effect, whereas defects extending across the inter-tooth visual boundary substantially increased the risk of critical segmentation errors.*

Key words: *intraoral scanner, digital impression, tooth segmentation, artificial intelligence, dental crowding, scan defects, orthodontics, digital model*

Вступ. Перспективи застосування інтраоральних сканів у сучасній ортодонтичній практиці прогресивно розширюються та на даному етапі охоплюють не лише можливості отримання цифрових відбитків для діагностики чи виготовлення ортодонтичних конструкцій, але й можливості отримання цифрових моделей з можливістю їх автоматизованої обробки для моніторингу змін положення зубів, формування віртуальних сетапів та аналізу оклюзійних співвідношень [1, 2, 3]. Цифровізація ортодонтичного робочого процесу закономірно супроводжується збільшенням кількості етапів, на яких результат клінічної процедури залежить від якості вихідного масиву цифрових даних [2, 3, 4, 5]. Відтак навіть локальні дефекти поверхні інтраорального скану, які візуально можуть розцінюватися як незначні, потенційно можуть впливати на результати наступних програмних операцій в ході опрацювання цифрової моделі [4, 5]. Водночас слід відмітити, що дефекти (прогалини) графічної сітки цифрової моделі, котрі представляють області недосканування, характеризуються найвищою поширеністю в порівнянні із іншими помилками інтраорального сканування [5].

Одним з найбільш важливих етапів у структурі цифрового ортодонтичного планування є сегментація окремих зубів [6]. Сегментація забезпечує відокремлення геометричної поверхні кожного зуба від суміжних зубів та ясен, що в подальшому дозволяє проводити моделювання переміщення окремих одиниць, визначати величину та напрямок запланованих переміщень, планувати віртуальний алгоритм лікування та проєктувати дизайн необхідних ортодонтичних конструкцій [6-11]. Розвиток алгоритмів штучного інтелекту та глибинного навчання значно скоротив час, необхідний для виконання даного етапу, а сучасні програмні комплекси забезпечують автоматичну детекцію та маркування зубів без необхідності первинної ручної анотації їх контурів [6, 11].

Попри високі інтегральні показники точності автоматичної сегментації, отримані в експериментальних та клінічних дослідженнях, результат такої залишається залежним від вихідних характеристик інтраорального скану як досліджуваного тривимірного об’єкта [6, 11, 12, 13]. Враховуючи, що алгоритм сегментації працює вже з сформованою цифровою моделлю як цілісним графічним об’єктом, будь-яка втрата, локальне спотворення чи помилкова реконструкція полігональної сітки потенційно змінює набір геометричних ознак, на основі яких система проводить диференціацію суміжних анатомічних структур [6, 11, 12]. Це особливо актуально у ділянках, де між сусідніми зубами відсутня чітко візуалізована ділянка розмежування, а наявний міжзубний контур визначається за складною конфігурацією та співвідношенням апроксимальних поверхонь [13, 14].

Ротація зубів, їх вестибулярне або язикове зміщення, перекриття апроксимальних поверхонь і зменшення доступності окремих ділянок для прямої оптичної реєстрації в ході сканування збільшують геометричну складність цифрової моделі [14]. У дослідженні Anh J.W. та колег було продемонстровано вплив порушень фізіологічного взаємоположення зубів на точність цифрових моделей, отриманих різними інтраоральними сканерами з ініціацією процесу сканування у різних ділянках [12]. Lin W.Q. та співавтори також встановили, що зі зростанням вираженості дефіциту довжини зубної дуги, показники правдивості інтраорального сканування потенційно можуть погіршуватися, хоча в досліджуваних умовах абсолютні відхилення залишалися у клінічно прийнятному діапазоні [13].

Таким чином, для пацієнтів зі скупченістю зубів потенційно формується подвійний фак-

тор ризику: з одного боку, складніша геометрія в проекції ділянки скупченості може знижувати правдивість, як складову точності, отриманого внутрішньоротового скану, а з іншого – локальні дефекти, характерні для ділянок з ускладненими можливостями для якісного сканування, можуть компрометувати результат автоматизованої сегментації зубів та коректного визначення меж між сусідніми одиницями зубного ряду [4, 6, 11, 13, 14].

При цьому доступні для аналізу літературні дані переважно характеризують загальну точність сканування або інтегральні метрики автоматизованої сегментації, тоді як питання залежності характеру сегментаційної помилки від конкретної топографічної локалізації дефекту цифрової поверхні залишається недостатньо деталізованим.

Мета дослідження. Оцінити вплив локалізації штучно сформованих дефектів поверхні інтраоральних сканів на якість автоматичної сегментації цифрових моделей у пацієнтів зі скупченістю зубів у фронтальній ділянці

Матеріали та методи дослідження. Дослідження було побудовано за експериментально-цифровим дизайном із використанням анонімізованих інтраоральних сканів нижньої щелепи пацієнтів, в яких відмічалися ознаки скупченості зубів у фронтальній ділянці.

До аналізу включали скани за умови повного відтворення зубної дуги, відсутності у пацієнтів ортодонтичних конструкцій, відсутності критично-значущих дефектів цифрової сітки у вихідному файлі, а також за можливості візуально простежити межі між усіма фронтальними зубами. Сканування, на основі якого були сформовані вихідні цифрові моделі, проводилося в межах стандартного клінічного протоколу; персональні дані пацієнтів перед початком аналізу були анонімізовані. Усі інтраоральні скани були отримані із застосуванням апарату внутрішньоротового сканера Medit i500 (Medit Corp., Сеул, Республіка Корея).

Всього до дослідження було залучено 18 вихідних цифрових моделей нижньої щелепи. На кожному вихідному скані визначали фронтальну ділянку від правого до лівого ікла та у проекції таких виконували штучне моделювання графічного дефекту, як імітацію дефекту сканування. Для кожного вихідного скану послідовно формували три дублікати, завдяки чому один і той самий досліджуваний цифровий об’єкт аналізувався у чотирьох досліджуваних умовах (сценаріях): 1) вихідний інтраоральний скан без штучно сформованих графічних дефектів (досліджуваний сценарій 1); 2) вихідний інтраоральний скан із штучно-сформованим локальним графічним дефектом на вестибулярній поверхні зуба (досліджуваний сценарій 2); 3) вихідний інтраоральний скан із штучно-сформованим дефектом в межах контактної поверхні одного зуба без переходу через візуальну лінію розмежування між сусідніми зубами (досліджуваний сценарій 3); 4) вихідний скан із штучно-сформованим дефектом контактної поверхні, який поширювався безпосередньо через візуальну лінію розмежування між сусідніми зубами (досліджуваний сценарій 4) (рис. 1).

Відтак загальна кількість цифрових моделей, на яких виконували автоматизовану сегментацію, становила 72 досліджувані об’єкти.

Штучне формування дефектів інтраоральних сканів здійснювали у програмному середовищі Medit Design (Medit Corp., Сеул, Республіка Корея) із використанням функцій локального редагування цифрової поверхні шляхом контрольованого видалення фрагмента полігональної сітки у відповідній анатомічній ділянці. Для кожного конкретного вихідного скану намагалися зберігати співставний обсяг видаленої поверхні (штучного графічного дефекту) між трьома експериментальними варіантами, змінюючи переважно топографічне положення дефекту, однак формуючи такий з використанням інструменту «Пензель» однакового вихідного розміру (рис. 2).

Такий підхід був обраний для мінімізації впливу самого розміру втраченої графічної інформації та з метою фокусного аналізу впливу саме топографічної локалізації дефекту.

При моделюванні вестибулярного дефекту видалений фрагмент розташовували у межах вестибулярної поверхні коронки та не допускали його поширення на мезіальну чи дистальну сторони зуба. У другій експериментальній моделі дефект локалізували в межах апроксимальної поверхні, однак зберігали безперервною основну графічну лінію, за якою візуально диференціювали межу між двома сусідніми зубами. У третій експериментальній моделі дефект розширювали таким чином, щоб він перетинав дану лінію та формував локальну втрату інформації безпосередньо в зоні міжзубного розмежування. Усі маніпуляції виконували лише у фронтальній ділянці нижньої щелепи.

Автоматичну сегментацію кожної цифрової моделі проводили окремо для всіх експеримен-

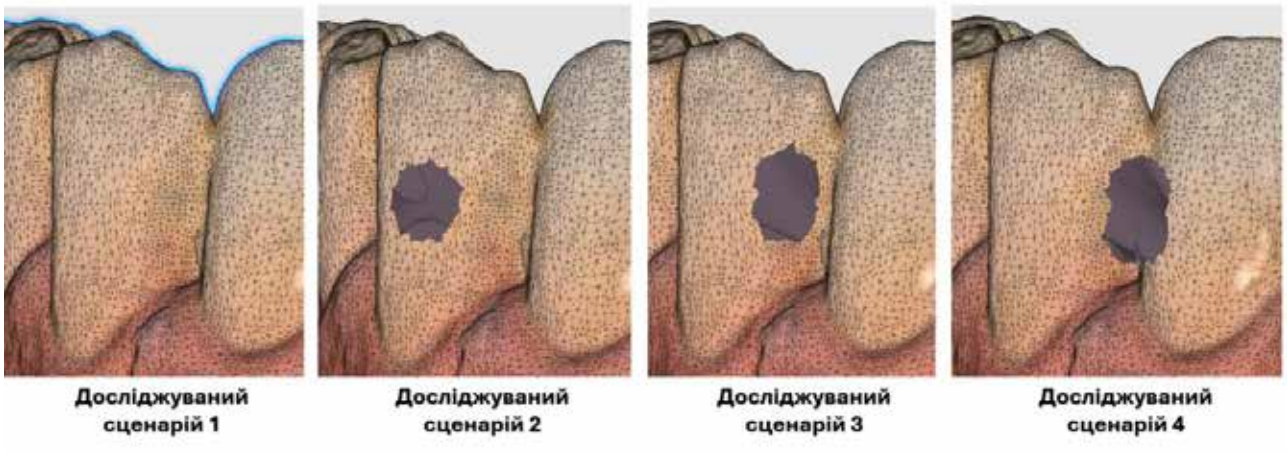


Рис. 1. Досліджувані сценарії з наявністю та відсутністю, а також різною локалізацією штучно сформованих дефектів графічної сітки

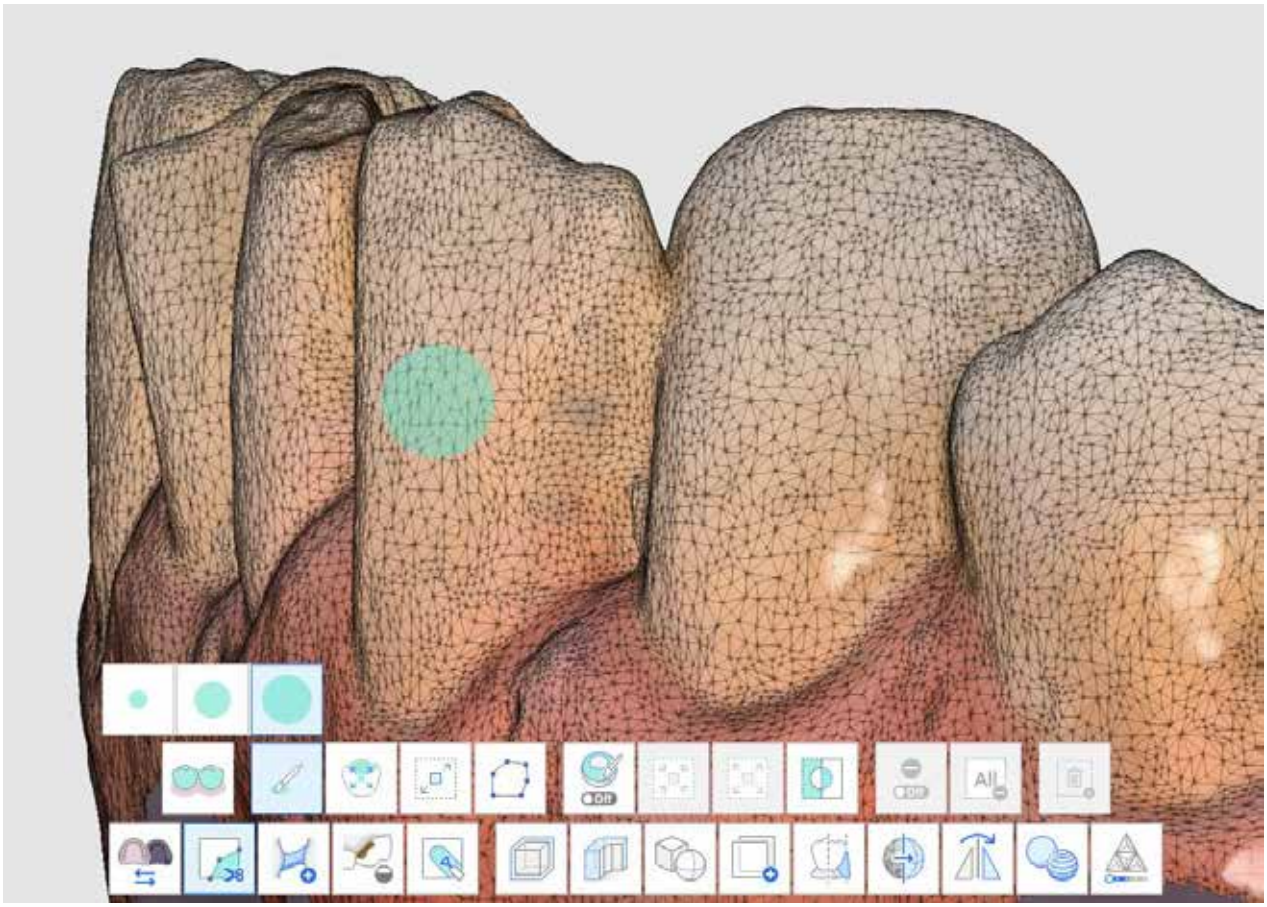


Рис. 2. Формування штучного дефекту графічної сітки інструментом «Пензель» стандартного розміру для усіх досліджуваних сценаріїв

тальних умов у Medit Ortho Simulation (Medit Corp., Сеул, Республіка Корея). Для вихідного скану результат автоматичної сегментації візуально перевіряли по всій фронтальній ділянці; після цього його використовували як базовий орієнтир для оцінки змін, що відмічалися після штучної модифікації відповідного дублікату (рис. 3).

Оцінку результату сегментації проводили за наступним визначеним набором потенційних наслідків, до якого включали: локальну недосегментацію частини поверхні зуба; надлишкову сегментацію із включенням суміжної поверхні; зміщення автоматично сформованої межі у контактній ділянці; часткове графічне об'єднання двох сусідніх зубів; фрагментацію одного зуба на

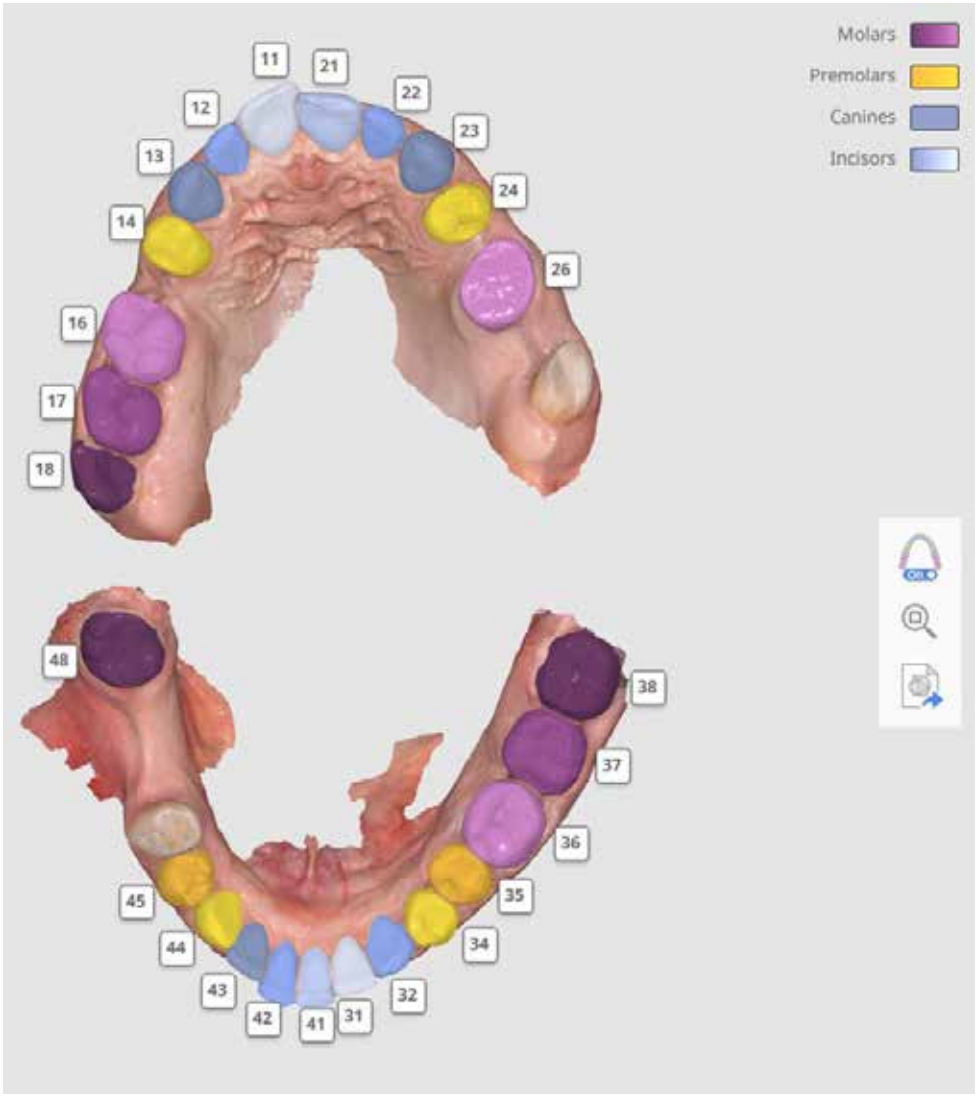


Рис. 3. Приклад автоматичної сегментації у Medit Ortho Analyzer

декілька сегментів; помилкове автоматичне маркування зуба.

Основним досліджуваним показником була частка цифрових моделей із хоча б одним візуально верифікованим дефектом автоматичної сегментації. Оскільки одні й ті самі 18 вихідних сканів оцінювали у чотирьох відмінних цифрових умовах дослідження, для порівняння частоти бінарного результату застосовували критерій Кохрена Q [15]. Рівень статистичної значущості встановлювали за умови $p < 0,05$. Групування даних, їх первинну систематизацію та структуризацію здійснювали у Microsoft Excel 2021 (Microsoft Corp., США), а статистичне опрацювання проводили із використанням XLSTAT (Addinsoft Inc., Нью-Йорк, США).

Результати та їх обговорення. На вихідних сканах без штучно сформованих дефектів повністю коректна автоматизована сегментація фронтальних зубів, котра не могла критично компрометувати майбутні клінічні етапи планування та лікування, була отримана у 14 із 18 випадків (77,78%), тоді як хоча б один значущий локальний дефект сегментації відмічався у 4 цифрових моделях (22,22%). У вихідних моделях без штучно сформованих дефектів дані порушення переважно характеризувалися незначним зміщенням міжзубної межі в найбільш виражених ділянках скупченості та не супроводжувалися критичним об'єднанням сусідніх зубів. Таким чином, навіть за відсутності спеціально сформованої втрати цифрової поверхні факт складної геометрії фронтальної ділянки був асоційований з похибками у структурі автоматичної сегментації окремих зубів.

Формування дефекту виключно на вестибулярній поверхні не супроводжувалося принциповою зміною характеру роботи алгоритму: коректна сегментація була відмічена у аналогічних 14 із 18 моделей (72,22%), тоді як принаймні один

дефект сегментації спостерігався у 5 із 18 моделей (27,78%), при цьому випадків повного або вираженого часткового графічного об'єднання двох сусідніх зубів не спостерігалося.

Інший характер результатів було встановлено після локалізації штучного дефекту на контактній поверхні зуба навіть за умови збереження безперервності візуальної лінії міжзубного розмежування. У даній серії коректна сегментація була зареєстрована у 10 із 18 випадків (55,56%), тоді як у 8 цифрових моделях (44,44%) було відмічено принаймні один критично-значущий дефект. Характерними проявами були локальне згладжування апроксимального контуру, недостатнє виділення контактної поверхні, критичне зміщення автоматично визначеної межі у мезіальному або дистальному напрямку. У 6 випадках (33,33%) відмічалося порушення прямо стосувалося положення межі сегментації, у 5 (27,78%) – відмічалися прояви локальної недосегментації, а у 3 (15%) – ознаки гіперсегментації з надлишковим захопленням поверхні сусіднього зуба; окремі моделі характеризувалися комбінацією зазначених проявів (рис. 4).

Найбільш несприятливі результати було зареєстровано у випадках, коли штучно сформований дефект контактної поверхні поширювався безпосередньо на ділянку візуального розмежування двох сусідніх зубів. Коректна автоматична сегментація у таких умовах зберігалася лише у 3 із 18 цифрових моделей (16,67%), тоді як у 15 випадках (83,33%) було відмічено дефекти різного характеру. Зміщення або втрата частини міжзубної межі була зареєстрована у 14 із 18 випадків (77,78%); часткове графічне об'єднання двох сусідніх зубів відмічалося у 9 випадках (50,00%); фрагментація сегмента окремого зуба – у 6 (33,33%), а некоректне автоматичне маркування одного із фронтальних зубів – у 4 випадках (22,22%). Частина цифрових моделей одночасно демонструвала декілька типів сегментаційних помилок (рис. 5).

Порівняння загальної частоти випадків некоректної сегментації між чотирма послідовними варіантами цифрової моделі за критерієм Кохрена засвідчило статистично значущу неоднорідність результатів ($Q=24,67$; $p<0,001$). При цьому сама наявність локального дефекту цифрової поверхні не може розглядатися як достатній предиктор вираженого порушення автоматичної сегментації, натомість більш важливим фактором-предиктором критичних похибок сегментації є топогра-

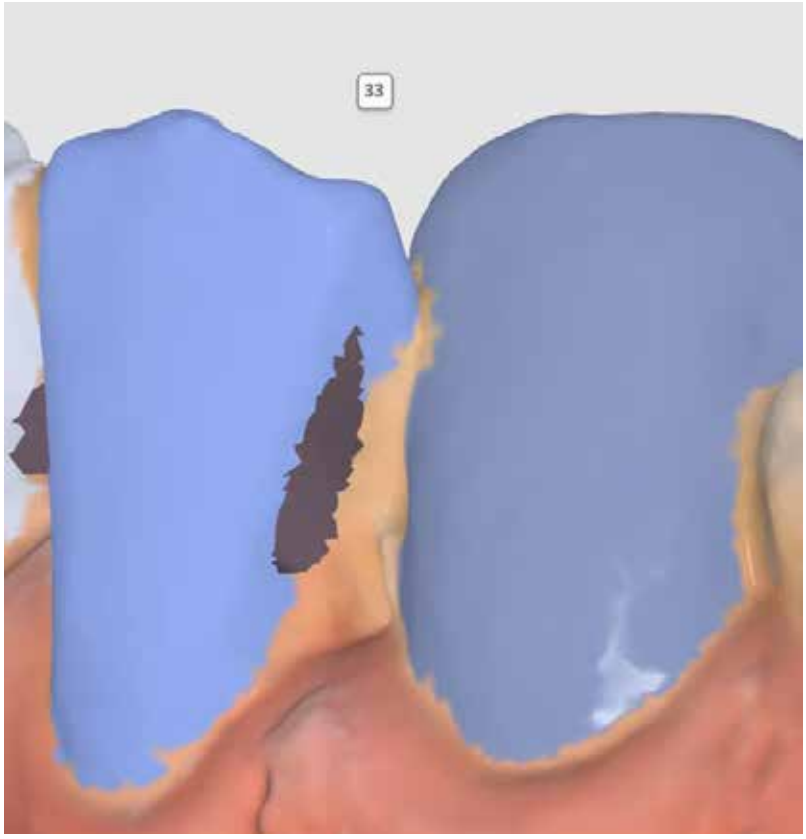


Рис. 4. Приклад дефектів сегментації при досліджуваному сценарії 3

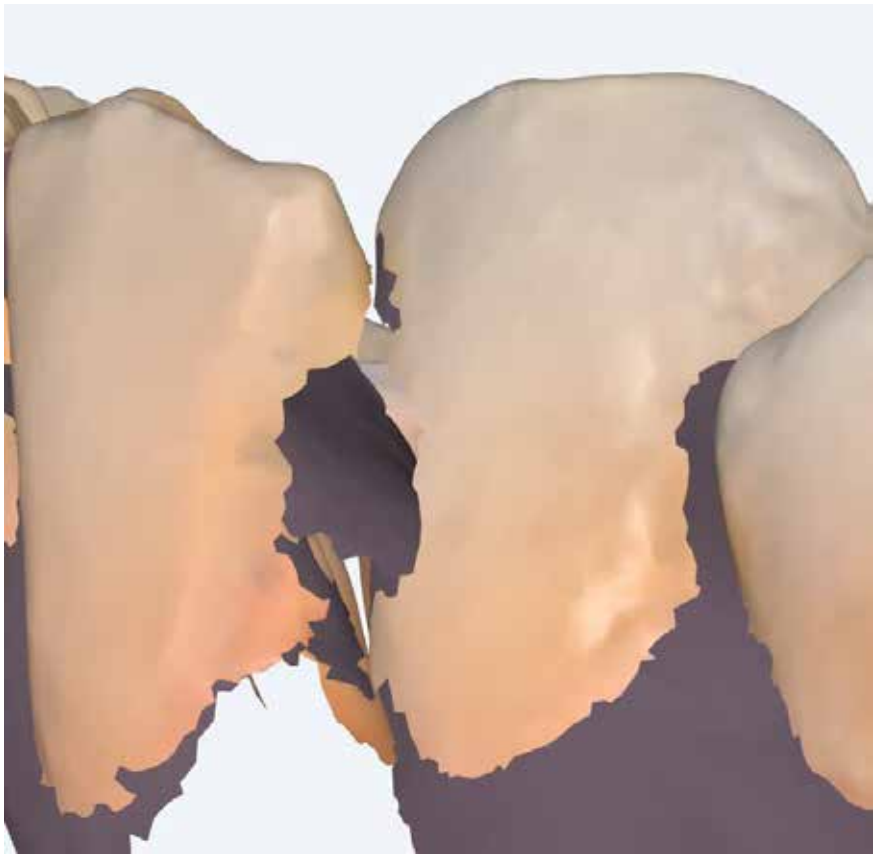


Рис. 5. Приклад дефектів сегментації при досліджуваному сценарії 4

фічне положення дефекту відносно ділянки, яка містить геометричну інформацію, необхідну для диференціації двох сусідніх зубів.

Отриманий розподіл порушень може бути пояснений принципами, за якими сучасні алгоритми автоматизованої сегментації аналізують графічні сітки трьохмірних моделей. У роботі Wu T.H. та співавторів для сегментації необроблених інтраоральних сканів було використано підхід вихідного аналізу цифрових сіток інтраоральних сканів, який інтегрує локальні та просторові характеристики цифрової поверхні [7]. Аналогічно сучасні моделі сегментації, які працюють на основі конволюційних алгоритмів штучного інтелекту та графічного процесингу, забезпечують аналіз взаєморозташування точок, граней, нормалей поверхонь та ознак локального рельєфу, на основі котрих проводиться відповідне розмежування контурів зубів [6, 8, 9, 10, 11]. В свою чергу втрата певної кількості полігонів у зоні відносно однорідної вестибулярної поверхні залишає алгоритму значну кількість альтернативних геометричних орієнтирів, тоді як дефект у зоні міжзубного розмежування безпосередньо компрометує одну з ключових локальних ознак, необхідних для проведення сегментаційної межі, внаслідок чого поширеність дефектів сегментації у двохвищезазначених сценаріях статистично відрізнялася ($p < 0,001$).

У клінічному порівняльному дослідженні Yacout Y.M. та колег було встановлено, що автоматична сегментація у Medit Ortho Simulation та dentOne в цілому характеризувалася високою точністю, однак певні ділянки зубів і міжзубні межі залишалися джерелом локальних невідповідностей, які потребують мануальної корекції [6]. Релевантне порівняння п’яти ШІ-базованих алгоритмів для сегментації та маркування інтраоральних сканів, до якого також було включено Medit Ortho Simulation, продемонструвало статистично значущі відмінності між програмними рішеннями та залежність інтегральних показників від структури вихідного зубного ряду [11]. Відтак дані попередніх досліджень засвідчують, що висока загальна результативність автоматичної сегментації не виключає наявності локальних сценаріїв, у яких якість вихідних цифрових даних стає критичним фактором впливу для кінцевої ефективності сегментації.

Необхідно окремо врахувати, що всі вихідні моделі даного дослідження характеризувалися скупченістю фронтальних зубів. Даний фактор

не слід трактувати як самостійну причину некоректної сегментації у кожному випадку, однак він створює більш складне геометричне середовище для реалізації алгоритмічного розмежування зубів.

Результати Anh J.W. та колег засвідчили, що варіації зміни взаємоположення зубів можуть впливати на точність отриманих цифрових моделей [12], а Lin W.Q. та співавтори продемонстрували послідовне погіршення правдивості сканування зі збільшенням вираженості скупченості [13]. Elhussain E. та колеги також засвідчили, що скупченість зубів статистично значуще впливає на показники правдивості та прецизійності інтраорального сканування, знижуючи їх незалежно від використовуваної моделі інтраорального сканера [14], хоча в науковій публікації de Freitas B. та колег було продемонстровано, що сканери, які працюють за технологією конфокальної мікроскопії все ж характеризуються вищим рівнем правдивості в умовах скупченості зубів, аніж апарати, котрі функціонують на основі лазер-базованого мультисканування [16]. Отже, в умовах скупченості зубів штучно сформований дефект у контактній ділянці накладається на складну вихідну геометрію цифрової моделі, що може пояснювати особливо виражену чутливість алгоритму до втрати інформації саме в зоні міжзубної межі.

З практичної точки зору важливим результатом є диференціація поняття «дефект скану» та «дефект сегментації» [4]. Перший являє собою втрату, відсутність фрагменту ділянки або локальну некоректність вихідної цифрової поверхні, тоді як другий є похідною помилкою програмної інтерпретації вже сформованої моделі. Однакові за візуальною вираженістю дефекти скану можуть провокувати принципово різний наслідок сегментації: дефект вестибулярної поверхні може залишатися локальним та практично не змінювати межі зуба, тоді як менша за площею втрата полігонів у контактній зоні здатна призвести до об'єднання двох зубів в один сегмент або до зміщення межі, що вже безпосередньо впливатиме на подальшу придатність отриманого цифрового сетапу.

Питання локального редагування та повторного отримання цифрової поверхні також має значення в контексті загальної точності інтраорального сканування, особливо для ділянок в проекції скупченості зубів, які часто характеризуються наявністю вихідних дефектів [4, 17, 18]. Одночасно у декількох дослідженнях було відмічено, що процедури видалення фрагментів скану з наступним повторним скануванням можуть знижувати правдивість цифрового відбитка, відтак було рекомендовано мінімізувати площу повторного захоплення при корекції наявних дефектів [17, 18, 19, 20]. При цьому слід відмітити, що різні протоколи відрізнялися за отриманим рівнем точності відтворення досканованих ділянок в залежності від реалізованої стратегії сканування та факту попереднього програмного блокування ділянок для мінімізації ефекту графічного зшивання та акумуляції похибки [18, 20, 21]. Хоча отримані в попередніх дослідженнях результати стосувалися переважно ситуацій інтраорального сканування для подальшої ортопедичної реабілітації з опорою на зубах та імплантатах, а дизайн нашого дослідження принципово відрізнявся та передбачав навмисне збереження дефекту для оцінки його впливу на сегментацію, наведені дані додатково підкреслюють, що локальні маніпуляції з цифровою сіткою не є нейтральним етапом і повинні контролюватися у межах повного цифрового протоколу.

Таким чином, для клінічного протоколу, який передбачає реалізацію етапу інтраорального сканування, доцільним є проведення візуального контролю якості вихідного інтраорального скану до запуску процедуру автоматизованої сегментації, особливо у пацієнтів зі скупченістю фронтальних зубів. Найбільшу увагу слід приділяти повноті відтворення апроксимальних поверхонь, безперервності графічної візуальної межі між сусідніми зубами та відсутності локальних дефектів сітки в контактній зоні. Виявлення незначного дефекту на вестибулярній поверхні не обов'язково потребує повторного сканування всієї ділянки, тоді як дефект, який перетинає міжзубну межу, доцільно розглядати як потенційно критичний для подальшої автоматичної сегментації та такий, що потребує виправлення та оптимізації. Виправлення таких дефектів можливе з проведенням процедури доскановування, однак при цьому доцільним є проведенням попереднього програмного блокування фрагменту скану, який не потребує покращення, задля уникнення феномену нашарування сканів та мінімізації ефекту графічного зшивання.

Необхідно відмітити, що більшість доступних на сьогодні програмних середовищ, асоційованих із інтраоральними сканерами, характеризуються можливостями автоматичного алгоритмічно-базованого заповнення графічних дефектів інтраорального скану. Такі алгоритми реалізуються за різними математичними принципами та харак-

теризуються різною ефективністю у відтворенні істинних геометричних характеристик недосканованих поверхонь. Так, Li H. та колеги описали, що алгоритм заповнення дефектів цифрових моделей на основі адаптивних порогових значень забезпечував 80% ефективність відтворення трикутників цифрової сітки з мінімальними значенням відстаней Хаусдорфа [22], а в пізнішому дослідженні автори описали ефективність застосування з аналогічною ціллю методу рухомих найменших квадратів, який забезпечував стабільне відтворення цифрової сітки належної якості в різних досліджуваних сценаріях [23].

Обмеження даного дослідження стосуються наступних аспектів: 1) використання лише одного програмного продукту для автоматичної сегментації; 2) штучний характер сформованих дефектів; 3) обмеження зони аналізу лише фронтальною ділянкою нижньої щелепи та відсутність окремої стратифікації результатів залежно від кількісного ступеня скупченості. Крім того, сформовані в цифровому середовищі дефекти переважно моделювали локальну втрату геометричних даних, тоді як реальні клінічні дефекти інтраорального сканування можуть поєднуватися із графічним шумом, спотворенням текстури, алгоритмічним заповненням недосканованих ділянок, помилками графічного зшивання та локальними деформаціями поверхні (рис. 6).

Перспектива подальших досліджень передбачає стратифікацію результатів сегментації залежно від ступеня скупченості, площі та конфігурації штучно сформованих дефектів, а також порівняння різних програмних систем ШІ-базованої сегментації. Перспективним є також визначення порогового розміру дефекту, після перевищення якого ймовірність помилки автоматичної сегментації статистично значуще зростає, та перевірка даного порогу на масиві інтраоральних сканів, отриманих не в експериментальних, а реальних клінічних умовах.

Висновки. У відповідності до отриманих результатів дослідження можна резюмувати, що різні локальні дефекти структури інтраоральних сканів характеризуються неоднаковим впливом на якість автоматичної сегментації зубів у пацієнтів з ознаками скупченості у фронтальній ділянці, а визначальним фактором значущості є топографічна локалізації дефектів по відношенню до зони графічного розмежування сусідніх зубів.

Штучно сформовані дефекти вестибулярної поверхні характеризувалися мінімальним впливом на результат автоматизованої сегментації та переважно провокували локальні порушення відтворення контуру без втрати коректної диференціації межі між сусідніми зубами. Дефекти контактної поверхні без переходу через візуальний контур розмежування зубів супроводжувалися

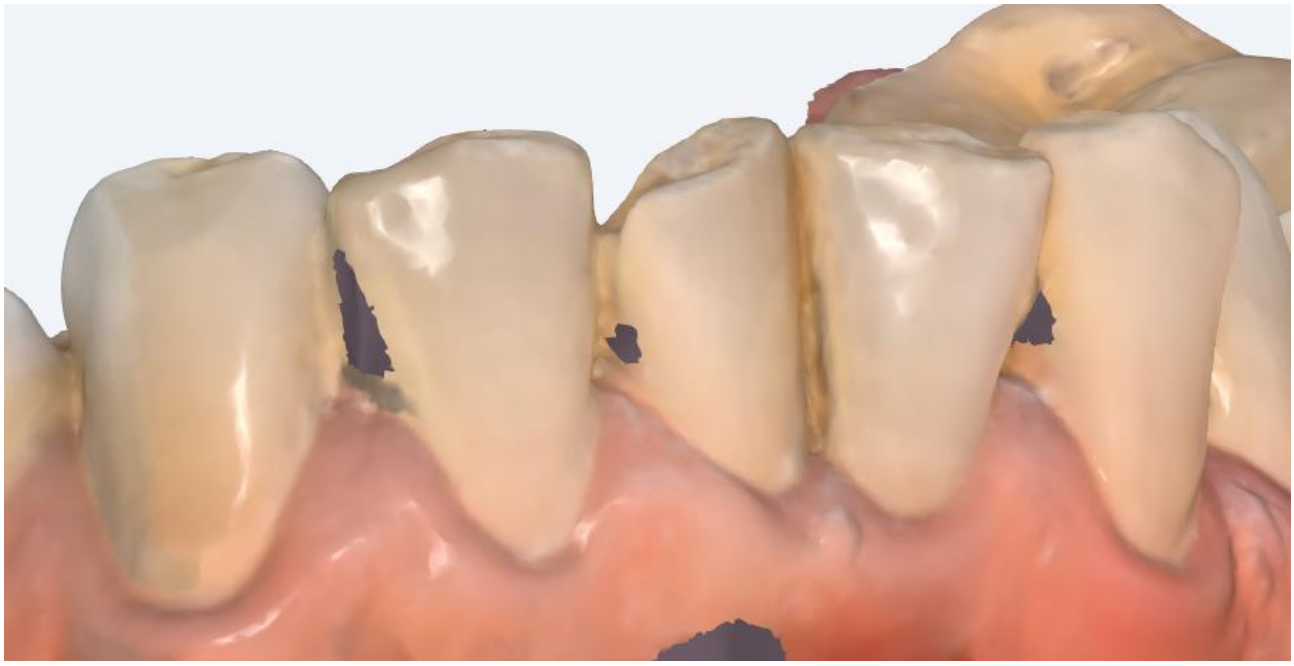


Рис. 6. Візуалізація наявних дефектів сканування та деформацій структури скану, отриманого у пацієнта з ознаками скупченості у фронтальній ділянці нижньої щелепи

збільшенням частоти випадків локальної недо- та гіперсегментації, згладжуванням апроксимального контуру та зміщенням автоматично сформованої межі між двома сусідніми одиницями зубного ряду.

Найбільш критичний вплив відмічався при поширенні графічного дефекту безпосередньо через візуальний контур розмежування двох сусідніх зубів. У таких умовах характерними порушеннями були втрата або значне зміщення сегментаційної межі, часткове об'єднання сусідніх зубів, фрагментація окремого сегмента та помилки автоматичного маркування. Частота моделей із хоча б одним дефектом сегментації при досліджуваному сценарії наявності дефекту скану в проекції візуального контуру розмежування між сусідніми зубами сягала 83,33%, тоді як у випадках сегментації зубів в умовах їх скупченості без виражених дефектів скану проблеми з сегментацією були відмічені лише в 22,22% проаналізованих випадків.

Скупченість зубів доцільно розглядати як фактор формування додаткової геометричної складності вихідної цифрової моделі, який в принципі може супроводжуватися зниженням показників правдивості інтраорального сканування та зростанням вихідної кількості дефектів інтраорального сканування у реальних клінічних умовах.

Конфлікт інтересів: Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався редактором, який не мав конфлікту інтересів з автором. Автор не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

References:

1. Christopoulou, I., Kaklamanos, E.G., Makrygiannakis, M.A., Bitsanis, I., Perlea, P., & Tsolakis, A.I. (2022). Intraoral scanners in orthodontics: a critical review. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 19(3), 1407. https://doi.org/10.3390/ijerph19031407

2. Alassiry, A.M. (2023). Clinical aspects of digital three-dimensional intraoral scanning in orthodontics–A systematic review. The Saudi Dental Journal, 35(5), 437-442. https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.04.004

3. Eggmann, F., & Blatz, M.B. (2024). Recent advances in intraoral scanners. *Journal of Dental Research,* 103(13), 1349-1357. https://doi.org/10.1177/00220345241271937

4. Revilla-León, M., Aragoneses, R., Arroyo Valverde, E.M., Gómez-Polo, M., & Kois, J.C. (2025). Classification of scanning errors of digital scans recorded by using intraoral scanners. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 37(6), 1363-1371. https://doi.org/10.1111/jerd.13419

5. Vasilescu, V.G., Ciocan, L.T., Imre, M., & Pituru, S.M. (2026). Clinical identification and classification of scanning errors in intraoral digital scans. *Journal of Dentistry,* 167, 106365. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2026.106365

6. Yacout, Y.M., Eid, F.Y., Tageldin, M.A., & Kassem, H.E. (2024). Evaluation of the accuracy of automated tooth segmentation of intraoral scans using artificial intelligence-based software packages. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics,* 166(3), 282-291.e1. https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.05.015

7. Wu, T.H., Lian, C., Lee, S., Pastewait, M., Piers, C., Liu, J., Wang, F., Wang, L., Chiu, C. Y., Wang, W., Jackson, C., Chao, W. L., Shen, D., & Ko, C. C. (2022). Two-Stage Mesh Deep Learning for Automated Tooth Segmentation and Landmark Localization on 3D Intraoral Scans. *IEEE Transactions on Medical Imaging,* 41(11), 3158-3166. https://doi.org/10.1109/TMI.2022.3180343

8. Wang, X., Alqahtani, K. A., Van den Bogaert, T., Shujaat, S., Jacobs, R., & Shaheen, E. (2024). Convolutional neural network for automated tooth segmentation on intraoral scans. *BMC Oral Health,* 24(1), 804. https://doi.org/10.1186/s12903-024-04582-2

9. Krenmayr, L., von Schwerin, R., Schaudt, D., Riedel, P., & Hafner, A. (2024). DilatedToothSegNet: Tooth Segmentation Network on 3D Dental Meshes Through Increasing Receptive Vision. *Journal of Imaging Informatics in Medicine,* 37(4), 1846-1862. https://doi.org/10.1007/s10278-024-01061-6

10. Li, J., Cheng, B., Niu, N., Gao, G., Ying, S., Shi, J., & Zeng, T. (2024). A fine-grained orthodontics segmentation model for 3D intraoral scan data. *Computers in Biology and Medicine,* 168, 107821. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107821

11. Del Cacho-Salvador, G., Burgos-Artizzu, X.P., García-Arranz, J., González-Martín, Ó., Oteo-Morilla, C., Gallas-Torreira, M., Cernadas, E., & Piedra-Cascón, W. (2026). Performance assessment of five artificial intelligence-based algorithms for automated tooth segmentation and labeling on intraoral scans. *Journal of Prosthodontics*, Advance online publication, 1046-1057. https://doi.org/10.1111/jopr.70117

12. Anh, J.W., Park, J.M., Chun, Y.S., Kim, M., & Kim, M. (2016). A comparison of the precision of three-dimensional images acquired by 2 digital intraoral scanners: effects of tooth irregularity and scanning direction. *The Korean Journal of Orthodontics,* 46(1), 3-12. https://doi.org/10.4041/kjod.2016.46.1.3

13. Lin, W.Q., Pan, C.Y., Chen, P.H., Liu, C.., Hung, C.C., & Lan, T.H. (2024). Trueness of intraoral scanning for different tooth-size arch-length deficiencies. *Journal of Dental Sciences,* 19(1), 397-403. https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.08.006

14. Elhussain, E., Figueras-Álvarez, O., Roig-Cayon, M., Ortega-Martínez, J., & Vidal-Ponsoda, C. (2025). Impact of dental crowding on the trueness and precision of intraoral scanners: Comparison across different devices and techniques. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics,* 168(6), 670–681. https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2025.08.004

15. Navarro, P., Alemán, I., Sandoval, C., Matamala, C., & Corsini, G. (2020). Statistical Testing Methods for Data Analysis in Dental Morphology. *International Journal of Morphology*, 38(5), 1317.

16. de Freitas, B.N., Capel, C.P., Vieira, M.A., Barbin, G.F., Cardoso, L., & Tirapelli, C. (2024). Do intraoral scanning technologies affect the trueness of dental arches with crowding, diastema, and edentulous spaces? A clinical perspective. *Journal of Dentistry,* 149, 105285. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105285

17. Revilla-Leon, M., Quesada-Olmo, N., Gomez-Polo, M., Sicilia, E., Farjas-Abadia, M., & Kois, J.C. (2021). Influence of rescanning mesh holes on the accuracy of an intraoral scanner: An in vivo study. *Journal of Dentistry,* 115, 103851. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103851

18. Revilla-León, M., Sicilia, E., Agustín-Panadero, R., Gómez-Polo, M., & Kois, J. C. (2023). Clinical evaluation of the effects of cutting off, overlapping, and rescanning procedures on intraoral scanning accuracy. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 130(5), 746-754. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.10.017

19. Guo, J., Lu, Y., Li, R., Zhou, K., Ge, R., Zhao, D., Xia, S., & Wang, Y. (2024). Influence of repeated cut-off and rescanning on the trueness of the intraoral digital scans. *Journal of Dentistry,* 150, 105153. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105153

20. Gomez-Polo, M., Piedra-Cascon, W., Methani, M.M., Quesada-Olmo, N., Farjas-Abadia, M., & Revilla-León, M. (2021). Influence of rescanning mesh holes and stitching procedures on the complete-arch scanning accuracy of an intraoral scanner: An in vitro study. *Journal of dentistry,* 110, 103690. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103690

21. Faur, A.B., Rotar, R.N., Adam, D., & Jivănescu, A. (2023). Rescanning of digital impressions' mesh holes: In vivo and in vitro accuracy evaluation of three different scanning protocols. *Applied Sciences,* 13(5), 2867. https://doi.org/10.3390/app13052867

22. Li, H.A., Wang, C., Yang, K., & Peng, L. (2026). 3D dental model hole filling based on adaptive threshold region segmentation. Computer Aided Geometric Design, 102602. https://doi.org/10.1016/j.cagd.2026.102602

23. Hongan, L.I., Kun, Y.A.N.G., Long, P.E.N.G., & Qingfang, L.I.U. (2026). 3D tooth semi-closed hole-filling algorithm based on the moving least-squares method. *Virtual Reality & Intelligent Hardware,* 8(3), 365-382. https://doi.org/10.1016/j.vrih.2026.04.002

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2026
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.09.2026
Дата публікації: 11.11.2026