

**“VICTOR BABEȘ” UNIVERSITY OF MEDICINE AND  
PHARMACY OF TIMIȘOARA  
FACULTY OF DENTAL MEDICINE  
DEPARTMENT II**

**GEORGE POPA**



# **PhD THESIS**

**CONSIDERATIONS ON BIOENGINEERING  
APPLICATIONS IN ORTHODONTICS**

**ABSTRACT**

Scientific Coordinator

**PROF. DR. ANCA JIVĂNESCU**

**Timișoara  
2025**



## ABSTRACT

The present PhD thesis, entitled “**Considerations on Bioengineering Applications in Orthodontics**”, reflects my research work that focused on the applications of biomedical imaging, biomaterials and biomechanics in the field of orthodontics. The thesis has made significant contributions to the scientific literature by providing valuable insights into the diagnosis and prognosis of complex craniofacial anomalies, as well as the advancement of modern biomaterials and technologies and their implementation into the current orthodontic practice to facilitate treatment outcomes.

The results of my research activity were published in four scientific articles as first author (three articles in impact factor journals indexed in Web of Science, one of which was also indexed in PubMed, and one article indexed in Index Copernicus) and one article in an impact factor journal indexed in Web of Science as coauthor.

The thesis comprises a general part, a special part, the final conclusions and directions for future research. The bibliography contains 256 relevant references, with more than 100 cited scientific works published in the past ten years.

**The general part** is structured in one chapter and refers to the main fields of activity of biomedical engineering, focusing primarily on the diverse applications of bioengineering in orthodontics.

Bioengineering, especially through the progress of biomedical engineering, has revolutionised the field of orthodontics, driving significant advancements in both clinical practice and patient care by integrating new and improved biomaterials and technologies, such as digital imaging, computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM), and other advances in biomedicine and regenerative medicine.

Nowadays, orthodontic patients have a growing interest in therapeutic solutions that combine effectiveness, aesthetic appeal, and affordability. In order to elevate diagnostic and prognosis accuracy, to streamline treatment planning, and to implement efficient therapeutic strategies, orthodontic practitioners must adopt a systematic and data-driven methodology, aspects that are further addressed in the special part of the thesis.

**The special part** is structured in two chapters, each further divided into three subchapters.

By advancing the applications of biomedical radiographic imaging and biomedical informatics in orthodontics, **Chapter 2** highlights several of the contributions that the present thesis brings to the development of orthodontic research, especially for the scientific literature in our country, which consist in the use of digital cephalometrics to evaluate several skeletal and upper airway cephalometric parameters, the correlations established between these parameters, and the potential sexual dimorphism in different classes of skeletal malocclusion. Even though these aspects were insufficiently studied, especially in the Caucasian population in western Romania, they might play a significant role in the diagnosis, prognosis and treatment planning of complex orthodontic cases.

In the retrospective study presented in **Subchapter 2.1**, we used a digital cephalometric analysis to evaluate several upper airway cephalometric parameters in skeletal Class I and Class II malocclusion. This study examined 60 lateral cephalometric radiographs from Romanian Caucasian adult patients aged 18 to 34 years (31 females and 29 males). Despite the limitations of 2D cephalometry, our findings showed significant sexual dimorphism regarding several parameters. In the skeletal Class II group, males had significantly reduced UPAW and MPAW measurements compared to females. Class I males exhibited significantly higher LPAW values than Class I females and significantly larger MPAW and LPAW dimensions than Class II males. However, no

statistically significant differences were observed between the skeletal Class I and Class II groups (independent of sex).

The study included in **Subchapter 2.2** aimed to evaluate the sexual dimorphism and to compare the upper airway width and the facial height parameters in adult Romanian Caucasians diagnosed with skeletal Class I and Class III malocclusion, using several linear and angular cephalometric measurements. This retrospective observational study analysed 100 lateral cephalograms obtained from adult patients aged 18 to 36 years (mean age: 24.7 years). Several angular parameters (SNA, SNB, ANB, FMA, Y-FH, Ba-S-PNS and NL-ML angles) and linear parameters (total, upper and lower anterior facial height – TAFH, UAFH, LAFH; total posterior facial height – TPFH) were analysed for each case. The upper airway width parameters included the width of the nasopharynx, as well as the upper, middle and lower pharyngeal airway width (UPAW, MPAW and LPAW).

Despite the limitations of 2D cephalometry, the relatively small sample size due to the low prevalence of Class III subjects in our population, and the fact that the classification based on Steiner's ANB angle and on the Wits appraisal cannot differentiate between various aetiologies of Class III malocclusion, the results showed distinct sexual dimorphism in several cephalometric parameters. Sexual dimorphism was evident in the vertical parameters for both Class I and Class III groups, with males showing significantly greater mean values for TAFH, UAFH, LAFH, and TPFH compared to females. Class III males exhibited greater UAFH than Class I males and were more likely to require combined orthodontic-surgical treatment with a more reserved prognosis compared to Class III females. Upper airway analysis showed that Class III females had greater UPAW than Class III males and larger LPAW than Class I females; additionally, females consistently showed larger nasopharyngeal depth angles in both skeletal groups.

These findings suggest that Class III males might face a higher risk of OSA, particularly post-mandibular setback surgery. Correlation analyses

indicated no significant relationships between the upper airway and the vertical parameters in Class I subjects. However, in Class III individuals, UPAW was inversely correlated with TAFH and LAFH. Additionally, the nasopharyngeal depth angle in both groups exhibited consistent negative correlations with the vertical dimensions. These results suggest that skeletal Class I and Class III malocclusions exhibit not only different sagittal relationships but also distinctive, sex-related vertical skeletal patterns within each group, and therefore it would be advised that male and female patients should be diagnosed and treated according to separate protocols.

Expanding the research on the population sample previously analysed in Subchapter 2.2, the aim of the study included in **Subchapter 2.3** was to investigate several cephalometric parameters using Björk-Jarabak's analysis and to evaluate the potential sexual dimorphism in Caucasian adults with Class I and Class III skeletal patterns in order to improve the characterisation, diagnosis and treatment management of these skeletal malocclusions.

Among Class I subjects, males had significantly larger linear measurements (S-N, S-Ar, Ar-tGo, tGo-Me), while females showed greater angular measurements (N-S-Ar and sum of angles). In contrast, Class III subjects showed sexual dimorphism exclusively in linear measurements, with males showing significantly larger values than females across all parameters. The interclass comparisons within the same sex groups revealed limited morphological variation. The interclass comparison between the entire Class I and Class III groups identified significant differences in both S-Ar-tGo and Ar-tGo, with Class III individuals showing smaller angular measurements but larger linear dimensions. Class I subjects showed more complex moderate correlations between the variables, featuring positive correlations among the linear measurements and inverse correlations between the angular and the linear parameters. Class III subjects, however, exhibited fewer and weaker correlations. Regarding the Björk-Jarabak analysis, our findings contribute to the

growing evidence that both ethnic background and sexual dimorphism play a significant role in craniofacial morphology.

**Chapter 3** addressed some of the applications of innovative manufacturing technologies in conjunction with different biomaterials in orthodontics.

**Subchapter 3.1** focused on another contribution of the present thesis that refers to the comparison of the biomechanical parameters of the welded joints without filler material between specific metal components of fixed orthodontic appliances, commonly used in current orthodontic practice – stainless steel buccal tubes and bands – by using alternative modern welding methods: laser and tungsten inert gas (TIG) welding. By comparing different welding methods and assessing the tensile and shear breaking force of the welded joints, the study aimed to prove whether the TIG welding technique can be a viable, less expensive alternative to laser welding. A set of 40 orthodontic molar bands (stainless-steel alloy AISI 304L/305L, for second upper left molars, size 21, Leone, Italy) and 40 buccal tubes (stainless-steel alloy AISI 316L, for upper left molars, 0.022x0.028-inch slot, Leone, Italy) were divided into four equal groups. Prior to welding, the pads of the buccal tubes were adapted using flat-nose orthodontic pliers to achieve a proper fit with a gap less than 0.5 mm between the pads and the surface of the bands, thus allowing for welded joints without filler material. The welding was carried out under an argon shielding atmosphere to prevent oxidation.

For the laser welding protocol, an XXS Laser (OROTIG) welding unit was used with the following parameters: 1.5 kW output power, 3 ms pulse duration and 1 Hz frequency. The beam incident angle was approximately 45° relative to the working surface. The corners of the pads were welded using three welding spots with a diameter of 0.7 mm. We made sure that consecutive spots overlapped 80% to 90% of the surface of the previous spot. For the TIG welding protocol, we used a PUK D2 (LAMPERT) welding unit configured to the steel welding program with 40% output power and a duration of 3 ms. To achieve a

total welded surface area comparable to the laser welded specimens (approximately 2–2.5 mm<sup>2</sup> distributed across four welded corners), we used a tungsten electrode with a 0.6 mm tip to create two discrete weld points per corner. Following the complete welding of each buccal tube, the tip of the electrode was resharpener.

The Z010 Zwick/Roell testing machine, equipped with mechanical holding grips, was used to determine the tensile and shear breaking force of the welded joints. The crosshead loading speed was set to 30 mm/min, and the measurements were recorded with a specialised software, testXpert II.

To reduce the deformation of the molar bands during testing and to improve the grip of the specimens, the orthodontic bands were reinforced with a core structure made out of an 8 mm diameter steel rod positioned in the centre of each band, while the remaining space was filled with a dual-cured orthodontic acrylic resin (Leocryl, Leone). To further ensure the secure grip of the specimens during the mechanical testing, a 0.6 mm round stainless-steel orthodontic wire was inserted through the buccal tubes and bent into a U-shaped loop.

We found that the laser welded joints between stainless-steel orthodontic bands and buccal tube attachments, without the use of filler material, exhibited higher mechanical strength compared to the TIG welded specimens during both the tensile ( $429.9 \text{ N} \pm 78.4 \text{ N}$  vs  $248.1 \text{ N} \pm 45.6 \text{ N}$ ,  $p < 0.001$ ) and shear testing ( $230.1 \text{ N} \pm 38.2 \text{ N}$  vs  $133.1 \text{ N} \pm 20.7 \text{ N}$ ,  $p < 0.001$ ).

In practical applications, both welding techniques proved suitable for orthodontic use under normal loading conditions. In patients with parafunctional habits that generate higher bite forces, weld failure may occur if the joint surface area is not sufficiently increased, especially for the TIG welded attachments.

Traditional space maintainers, manufactured from soldered metal parts, such as stainless-steel bands and wires, typically following the band-and-loop design, exhibit optimal mechanical properties, yet the retention strength and long-term durability of 3D printed space maintainers still require further research. Addressing another class of biomaterials, the main objective of the study



presented in **Subchapter 3.2** was to compare the compressive mechanical performance of aesthetic space maintainers fabricated through digital techniques, using additive manufacturing – stereolithography (SLA) and masked SLA (MSLA/LCD), as well as subtractive manufacturing.

The case of an 8-year-old patient was selected for this study. The patient prematurely lost 7.5 and 8.4 because of extensive carious lesions. After digitally scanning the dental casts, the space maintainers were designed using specialised CAD software. Based on the exported .stl files, 28 space maintainers were fabricated using two additive manufacturing techniques, with seven specimens in each experimental group. The specimens in the LCD group were manufactured using a Phrozen Sonic Mini 4K printer with two resin materials: TC100 Temporary Crown & Bridge Resin and the plant-based Anycubic UV resin. The specimens in the SLA group were manufactured using a Formlabs Form 2 printer with two resin materials: Next Dent C&B Micro Filled Hybrid resin and Harz Labs Dental Bleach colour resin. Additionally, seven specimens were produced using a subtractive technique. These were milled from Tempo Block PMMA discs (D3 colour) with a 5-axis PrograMill PM7 milling machine. The printed specimens were cleaned in an isopropyl alcohol bath to remove any remaining residue, followed by polymerisation in a UV curing unit. The specimens were then placed on a 3D printed study model manufactured using fused deposition modelling (FDM).

The mechanical tests were performed using a Zwick/Roell Z 005 machine, which applied a constant force to the arms of the space maintainers through a plastic wedge, until the specimens fractured.

One-way ANOVA identified statistically significant differences in compression breaking force among the manufacturing techniques ( $p < 0.001$ ). The compression breaking force progressively increased: LCD\_TC100 (68.54 N  $\pm$  14.15 N), SLA\_Harz (81.78 N  $\pm$  9.50 N), SLA\_Next (95.52 N  $\pm$  13.22 N), and finally the milled specimens (199.94 N  $\pm$  27.71 N). Tukey's post hoc analysis showed three significant pairwise differences: the milled group showed

significantly greater values for the compression breaking force than the LCD\_TC100 group (mean difference = 131.40 N,  $p < 0.001$ ), the SLA\_Harz group (118.16 N,  $p < 0.001$ ), and the SLA\_Next group (107.42 N,  $p < 0.001$ ). However, no statistically significant differences were found between any of the LCD\_TC100, SLA\_Harz, and SLA\_Next groups.

During the active phase of the orthodontic treatment with fixed appliances, the brackets and the buccal tubes must withstand significant occlusal forces during mastication or during orthodontic adjustments without failing, especially when the braces are bonded to temporary crowns. A final objective of this thesis, presented in **Subchapter 3.3**, was to evaluate the shear breaking force of buccal tubes bonded to 3D printed materials for provisional crowns, comparing two printing materials and two adhesive systems. Although these printing materials are gaining popularity in current practice, their mechanical performance in orthodontic applications has not been sufficiently explored.

MeshInspector software was used to generate the final design for the specimens, based on an .stl file of an upper left first molar. The specimens were printed using two resin materials: GC Temp PRINT (GC Corporation, Tokyo, Japan), a 3D printable light-curing composite, free of methyl methacrylate, for temporary crown and bridge restorations, and V-Print c&b Temp (VOCO GmbH, Cuxhaven, Germany), a light-curing resin designed for highly aesthetic and long-term provisional restorations. For both printing materials, all the specimens were printed according to the same protocol using a desktop MSLA 3D printer (Original Prusa SL1, Prusa Research, Prague, Czech Republic). Before each printing session, the printer was calibrated to meet the exposure settings recommended by the manufacturers. The specimens were arranged and sliced using the printer's dedicated software (PrusaSlicer, v2.5.2, Prusa Research, Prague, Czech Republic). The specimens were printed using a 0.025 mm (ultra detail) layer height and a 45° printing angle to enhance printing accuracy and to minimise voxel lines. The printing supports were positioned on the oral side of

the specimens to avoid alterations or contact with the buccal surfaces of the molars, which were designated for the placement of the buccal tubes. Post-processing included washing in 99% isopropyl alcohol for 5 minutes, removing the supports, air-drying for 15 minutes and photopolymerising with the Prusa CW1 machine for a 10-minute curing cycle.

A total of 20 buccal tubes (UL, 0.022-inch Roth, Schnawis) were divided into four equal groups and were bonded to the printed specimens using two adhesive systems: 3M™ Transbond™ XT (primer and orthodontic adhesive cement) and a universal adhesive, 3M™ Scotchbond™ Universal Plus, coupled with a universal resin cement, 3M™ RelyX™ Universal.

After the primer/adhesive was applied with a microbrush applicator and rubbed on the buccal surface of the specimens for 20 seconds, it was uniformly distributed and gently air-dried using an air spray for 5 seconds. The adhesive cement was applied directly to the pad of the buccal tubes, which were properly positioned by centring the buccal tube pad over the buccal groove of the molars, while the occlusal edge of the pad followed the mesio-distal contact line of the molar. After the excess was carefully removed, the cement was cured for 20 seconds, 10 seconds from the mesial and 10 seconds from the distal side of the buccal tube, using an LED curing lamp with a light intensity of 1500 mW/cm<sup>2</sup>.

The shear breaking force of the bonded interface between the buccal tubes and the printed specimens was determined using the Mecmesin MultiTest 5-i testing machine in the Department of Mechanics and Strength of Materials at Politehnica University of Timișoara. The loading speed was set at 5 mm/min. The specimens were secured to a fixed vertical metal plate using a metal bolt through a tunnel drilled in the middle of each specimen. A metal blade was fixed to the moving arm of the testing machine and was placed in contact with the pad of the buccal tube, without touching the printed surface of the specimens.

The experimental conditions in our study did not fully replicate those found in the oral environment or the clinical scenario of orthodontic bracket removal. However, we found that all mechanical testing resulted in cohesive

failure of the printed specimens, demonstrating that the bonding strength of both adhesive systems exceeded the mechanical strength of the printed materials (the highest mean strength recorded in our study was around 9.8 MPa for the V-Print c&b Temp printing material with the Transbond™ XT adhesive system). No statistically significant differences were found between the shear breaking force when comparing the two types of printing materials. Under typical bite forces, both the 3D printed materials and the adhesive systems should perform adequately, but they might fail under high bite forces.

The aforementioned studies generate a positive social impact through their contribution to the treatment, as well as to the diagnosis and prognosis of complex craniofacial anomalies. As orthodontics continues to evolve, the integration of improved biomaterials and manufacturing technologies will play a major role in providing patient-centred, high-quality medical care.

**The final part** of the thesis addresses the directions for future research:

- taking into account larger population samples from different ethnic backgrounds and a larger database of cephalometric variables that could further clarify the relationship between the sagittal and vertical skeletal patterns and the upper airway morphology;
- extending research to also include parameters in the transverse plane;
- the use of CBCT imaging in order to better characterise the morphology and the volume of the upper airways;
- the integration of artificial intelligence into current practice to facilitate the assessment of the prognosis of dento-maxillary anomalies based on analysed cephalometric parameters and potential correlations established between these parameters;
- the development of improved polymers for 3D printing with better mechanical properties that are more suited for patients who develop high masticatory forces;

- the analysis of other factors that could influence the mechanical properties of 3D printed materials, such as increased photopolymerisation time (especially for printing materials designed for DLP printers but used in conjunction with LCD printers), the effect of using different printing angles, and the impact of thermocycle material ageing.

**UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE  
„VICTOR BABEȘ” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MEDICINĂ DENTARĂ  
DEPARTAMENTUL II**

**POPA GEORGE**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**CONSIDERAȚII PRIVIND APLICAȚIILE  
BIOINGINERIEI ÎN ORTODONȚIE**

**REZUMAT**

Conducător de doctorat

**PROF. UNIV. DR. JIVĂNESCU ANCA**

**Timișoara  
2025**



## REZUMAT

Prezenta teză de doctorat, intitulată „**Considerații privind aplicațiile bioingineriei în ortodonție**”, reflectă activitatea mea de cercetare axată pe aplicațiile imagisticii biomedicale, biomaterialelor și biomecanicii în domeniul ortodonției. Teza a adus contribuții semnificative la literatura științifică, oferind informații valoroase atât în ceea ce privește diagnosticul și prognosticul anomaliilor craniofaciale complexe, cât și în ceea ce privește progresul biomaterialelor și tehnologiilor moderne și implementarea acestora în practica ortodontică actuală pentru a facilita rezultatele tratamentului.

Rezultatele activității mele de cercetare s-au concretizat prin publicarea a patru articole științifice ca prim autor (trei articole în reviste cu factor de impact indexate în Web of Science, dintre care unul a fost indexat și în PubMed, și un articol indexat în Index Copernicus) și a unui articol într-o revistă cu factor de impact indexată în Web of Science în calitate de coautor.

Teza cuprinde o parte generală, o parte specială, concluziile finale și direcțiile viitoare de cercetare. Bibliografia conține 256 de referințe relevante, cu peste 100 de lucrări științifice citate publicate în ultimii zece ani.

**Partea generală** este structurată într-un singur capitol și se referă la principalele domenii de activitate ale ingineriei biomedicale, concentrându-se în principal pe diversele aplicații ale bioingineriei în ortodonție.

Bioingineria, în special prin progresul ingineriei biomedicale, a revoluționat domeniul ortodonției, determinând progrese semnificative atât în practica clinică, cât și în îngrijirea pacienților, prin integrarea de noi biomateriale și tehnologii îmbunătățite, precum imagistica digitală, proiectarea și fabricarea asistată de calculator (CAD/CAM) și alte progrese în biomedicină și medicina regenerativă.

În prezent, pacienții cu anomalii dento-maxilare manifestă un interes crescut pentru soluții terapeutice care combină eficacitatea, aspectul estetic și



accesibilitatea. Pentru a îmbunătăți acuratețea diagnosticului și a prognosticului, pentru a optimiza planificarea tratamentului și pentru a implementa strategii terapeutice eficiente, medicii ortodonți trebuie să adopte o metodologie sistematică, bazată pe date concrete, aspecte care sunt abordate în detaliu în partea specială a tezei.

**Partea specială** este structurată în două capitole, fiecare fiind împărțit în trei subcapitole.

Prin promovarea aplicațiilor imagisticii radiografice biomedicale și a informaticii biomedicale în ortodonție, **capitolul 2** evidențiază câteva dintre contribuțiile pe care prezenta teză le aduce la dezvoltarea cercetării în ortodonție, în special pentru literatura științifică din țara noastră, care constă în utilizarea cefalometriei digitale pentru evaluarea mai multor parametri cefalometrici scheletali și ai căilor aeriene superioare, corelațiile stabilite între acești parametri și potențialul dimorfism sexual în diferite clase de malocluzie scheletală. Cu toate că aceste aspecte au fost insuficient studiate, în special în populația caucaziană din vestul României, ele ar putea juca un rol semnificativ în diagnosticul, prognosticul și planificarea tratamentului în cazurile clinice complexe.

În studiul retrospectiv prezentat în **subcapitolul 2.1**, am utilizat o analiză cefalometrică digitală pentru a evalua mai mulți parametri cefalometrici ai căilor aeriene superioare în malocluzia scheletală de Clasa I și Clasa a II-a. Acest studiu a examinat 60 de teleradiografii laterale de la pacienți adulți caucazieni români cu vârste cuprinse între 18 și 34 de ani (31 de femei și 29 de bărbați). În ciuda limitărilor cefalometriei 2D, rezultatele studiului au arătat un dimorfism sexual semnificativ în ceea ce privește mai mulți parametri. În grupul cu malocluzie scheletală de Clasa a II-a, bărbații au prezentat valori semnificativ mai mici ale lățimii căilor aeriene faringiene superioare și medii (UPAW și MPAW) în comparație cu femeile. Bărbații cu malocluzie de Clasa I au prezentat valori semnificativ mai mari ale lățimii căilor aeriene faringiene inferioare (LPAW) față de femeile cu malocluzie de Clasa I și dimensiuni semnificativ mai mari ale

MPAW și LPAW față de bărbații cu malocluzie de Clasa a II-a. Cu toate acestea, nu s-au observat diferențe semnificative din punct de vedere statistic între grupurile cu malocluzie scheletală de Clasa I și Clasa a II-a (independent de sex).

Studiul inclus în **subcapitolul 2.2** a avut ca scop evaluarea dimorfismului sexual și compararea lățimii căilor aeriene superioare și a parametrilor înălțimii faciale la adulți caucazieni români diagnosticați cu malocluzie scheletală de Clasa I și Clasa a III-a, utilizând mai multe măsurători cefalometrice liniare și unghiulare. Acest studiu observațional retrospectiv a analizat 100 de teleradiografii laterale obținute de la pacienți adulți cu vârste cuprinse între 18 și 36 de ani (vârsta medie: 24,7 ani). Au fost analizați mai mulți parametri unghiulari (unghiurile SNA, SNB, ANB, FMA, Y-FH, Ba-S-PNS și NL-ML) și parametri liniari (înălțimea facială anterioară totală, superioară și inferioară – TAFH, UAFH, LAFH; înălțimea facială posterioară totală – TPFH) pentru fiecare caz în parte. Parametrii lățimii căilor aeriene superioare au inclus lățimea nazofaringelui, precum și lățimea căilor aeriene faringiene superioare, medii și inferioare (UPAW, MPAW și LPAW).

În ciuda limitărilor cefalometriei 2D, a dimensiunii relativ mici a eșantionului datorită prevalenței scăzute a subiecților de Clasa a III-a în populația noastră și a faptului că clasificarea bazată pe unghiul ANB al lui Steiner și pe analiza Wits nu poate diferenția între diferite etiologii ale malocluziei de Clasa a III-a, rezultatele au arătat un dimorfism sexual distinct în cazul mai multor parametri cefalometrici. Dimorfismul sexual a fost evident în parametrii verticali atât pentru grupul de Clasa I, cât și pentru cel de Clasa a III-a, bărbații prezentând valori medii semnificativ mai mari pentru TAFH, UAFH, LAFH și TPFH în comparație cu femeile. Bărbații din Clasa a III-a au prezentat valori mai mari ale UAFH decât bărbații din Clasa I, fiind predispuși la a necesita mai degrabă un tratament combinat ortodontic-chirurgical, cu un prognostic mai puțin favorabil în comparație cu femeile din Clasa a III-a. Analiza căilor aeriene superioare a arătat că femeile din Clasa a III-a au avut valori mai mari ale UPAW

decât bărbații din Clasa a III-a și valori mai mari ale LPAW decât femeile din Clasa I; în plus, femeile au prezentat în mod constant unghiuri ale adâncimii nazofaringiane mai mari în ambele grupuri scheletale.

Aceste constatări sugerează că bărbații din Clasa a III-a ar putea prezenta un risc mai mare de a dezvolta sindrom de apnee obstructivă în somn (OSA), în special în urma intervențiilor de chirurgie ortognată de setback mandibular. Analizele de corelație nu au indicat relații semnificative între căile aeriene superioare și parametrii verticali la subiecții din Clasa I. Cu toate acestea, la indivizii din Clasa a III-a, UPAW a fost invers corelată cu TAFH și LAFH. În plus, unghiul adâncimii nazofaringiane în ambele grupuri a prezentat corelații negative cu dimensiunile verticale. Aceste rezultatele evidențiază faptul că malocluziile scheletale de Clasa I și Clasa a III-a prezintă nu numai relații sagitale diferite, ci și pattern-uri scheletale verticale distinctive, legate de sex, în cadrul fiecărui grup și, prin urmare, se recomandă ca pacienții de sex masculin și feminin să fie diagnosticați și tratați conform unor protocoale terapeutice separate.

Extinzând cercetarea asupra eșantionului de populație analizat anterior în subcapitolul 2.2, scopul studiului inclus în **subcapitolul 2.3** a fost de a investiga mai mulți parametri cefalometrici specifici analizei Björk-Jarabak și de a evalua potențialul dimorfism sexual la adulții caucazieni cu tipare scheletale de Clasa I și Clasa a III-a, în vederea îmbunătățirii caracterizării, diagnosticării și gestionării tratamentului acestor malocluzii.

În rândul subiecților din Clasa I, bărbații au prezentat măsurători liniare semnificativ mai mari (S-N, S-Ar, Ar-tGo, tGo-Me), în timp ce femeile au prezentat măsurători unghiulare mai mari (N-S-Ar și suma unghiurilor). În contrast, subiecții din Clasa a III-a au prezentat dimorfism sexual exclusiv în măsurătorile liniare, bărbații prezentând valori semnificativ mai mari decât femeile în cazul tuturor parametrilor. Comparațiile dintre cele două clase în cadrul grupurilor de același sex au relevat variații morfologice limitate. Comparația dintre grupurile de Clasa I și Clasa a III-a, analizate în ansamblu, a

identificat diferențe semnificative atât la nivelul unghiului articular (S-Ar-tGo), cât și la nivelul înălțimii ramului ascendent (Ar-tGo), indivizii din Clasa a III-a prezentând măsurători unghiulare mai mici, dar dimensiuni liniare mai mari. Subiecții din Clasa I au prezentat corelații moderate mai complexe între variabile, cu corelații pozitive între măsurătorile liniare și corelații inverse între parametrii unghiulari și liniari. Subiecții din Clasa a III-a, însă, au prezentat corelații mai puține și mai slabe. În ceea ce privește analiza Björk-Jarabak, concluziile noastre contribuie la dovezile tot mai numeroase că atât originea etnică, cât și dimorfismul sexual joacă un rol semnificativ în morfologia craniofacială.

**Capitolul 3** a abordat câteva dintre aplicațiile tehnologiilor inovatoare de fabricare în combinație cu diferite biomateriale utilizate în ortodonție.

**Subcapitolul 3.1** s-a concentrat pe o altă contribuție a prezentei teze, care se referă la compararea parametrilor biomecanici ai îmbinărilor sudate fără material de adaos între componentele metalice specifice aparatelor ortodontice fixe, utilizate în mod obișnuit în practica ortodontică actuală – tuburi vestibulare și inele ortodontice din oțel inoxidabil – prin utilizarea unor metode moderne alternative de sudare: tehnica de sudare laser și TIG (tungsten inert gas). Prin compararea diferitelor metode de sudare și evaluarea forței de rupere la tracțiune și forfecare a îmbinărilor sudate, studiul a urmărit să demonstreze dacă tehnica de sudare TIG poate fi o alternativă viabilă și mai puțin costisitoare la sudarea cu laser. Un set de 40 de inele ortodontice (aliaj de oțel inoxidabil AISI 304L/305L, pentru molarii superiori de partea stângă, dimensiune 21, Leone, Italia) și 40 de tuburi vestibulare (aliaj de oțel inoxidabil AISI 316L, pentru molarii superiori de partea stângă, 0,022x0,028-inch slot, Leone, Italia) au fost împărțite în patru grupuri egale. Înainte de sudare, tălpile tuburilor vestibulare au fost ajustate folosind clești ortodontici cu vârf plat pentru a obține o adaptare intimă, cu un spațiu mai mic de 0,5 mm între talpă și suprafața inelelor, permițând astfel îmbinări sudate fără material de adaos. Sudarea a fost efectuată într-o atmosferă protectoare de argon pentru a preveni oxidarea.

Pentru protocolul de sudare cu laser, s-a utilizat o unitate de sudare XXS Laser (OROTIG) cu următorii parametri: putere de ieșire de 1,5 kW, durata impulsului de 3 ms și frecvență de 1 Hz. Unghiul de incidență al fasciculului laser a fost de aproximativ  $45^\circ$  față de suprafața de lucru. Colțurile tălpilor au fost sudate folosind trei puncte de sudură cu un diametru de 0,7 mm. Ne-am asigurat că punctele de sudură consecutive s-au suprapus cu 80% până la 90% din suprafața punctelor anterioare. Pentru protocolul de sudare TIG, am utilizat o unitate de sudare PUK D2 (LAMPERT) configurată pentru programul de sudare a oțelului, cu o putere de ieșire de 40% și o durată de 3 ms. Pentru a obține o suprafață totală sudată comparabilă cu cea a epruvetelor sudate cu laser (aproximativ 2-2,5 mm<sup>2</sup> distribuită pe patru colțuri sudate), am utilizat un electrod de tungsten cu vârf de 0,6 mm pentru a crea două puncte de sudură la nivelul fiecărui colț. După sudarea completă a fiecărui tub vestibular, vârful electrodului a fost reascuțit.

Mașina de testare Z010 Zwick/Roell, echipată cu bacuri mecanice, a fost utilizată pentru a determina forța de rupere la tracțiune și forfecare a îmbinărilor sudate. Viteza de încărcare a fost setată la 30 mm/min, iar măsurătorile au fost înregistrate cu un software specializat testXpert II.

Pentru a reduce deformarea inelelor ortodontice în timpul testării și pentru a îmbunătăți aderența epruvetelor, inelele ortodontice au fost consolidate cu o structură centrală formată dintr-o tijă de oțel cu diametrul de 8 mm poziționată în centrul fiecărui inel, spațiul rămas fiind umplut cu o rășină acrilică ortodontică cu polimerizare duală (Leocryl, Leone). Pentru a asigura o prindere optimă a epruvetelor în timpul testării mecanice, s-a introdus un fir ortodontic rotund din oțel inoxidabil de 0,6 mm prin tuburile vestibulare, care a fost conformat în formă de buclă în U.

Îmbinările sudate cu laser realizate între inelele ortodontice din oțel inoxidabil și tuburile vestibulare, fără utilizarea unui material de adaos, au prezentat o rezistență mecanică mai mare în comparație cu probele sudate TIG

atât în timpul testelor de tracțiune ( $429,9 \text{ N} \pm 78,4 \text{ N}$  vs  $248,1 \text{ N} \pm 45,6 \text{ N}$ ,  $p < 0,001$ ), cât și de forfecare ( $230,1 \text{ N} \pm 38,2 \text{ N}$  vs  $133,1 \text{ N} \pm 20,7 \text{ N}$ ,  $p < 0,001$ ).

În aplicațiile ortodontice uzuale, ambele tehnici de sudare s-au dovedit adecvate în condiții normale de solicitare. La pacienții care prezintă parafuncții, care au potențialul de a dezvolta forțe masticatorii mari, punctele de sudură pot ceda, dacă nu se mărește suprafața de sudură, în special pentru tehnica de sudare TIG.

Menținătoarele de spațiu clasice, fabricate din componente metalice sudate, cum ar fi inelele ortodontice și sârmă din oțel inoxidabil, având de obicei designul de inel cu buclă, prezintă proprietăți mecanice optime, însă retenția și durabilitatea pe termen lung a menținătoarelor de spațiu printate 3D necesită încă cercetări suplimentare. Abordând o altă clasă de biomateriale, obiectivul principal al studiului prezentat în **subcapitolul 3.2** a fost compararea performanțelor mecanice la compresiune ale menținătoarelor de spațiu estetice fabricate prin tehnici digitale, utilizând fabricarea aditivă – stereolitografie (SLA) și SLA mascată (MSLA/LCD), precum și fabricarea substractivă.

Pentru acest studiu a fost selectat cazul unui pacient în vârstă de 8 ani. Pacientul a pierdut precoce molarii 7.5 și 8.4 din cauza leziunilor carioase extinse. După scanarea digitală a modelelor de studiu, menținătoarele de spațiu au fost proiectate folosind un software CAD specializat. Pe baza fișierelor .stl exportate, au fost fabricate 28 de menținătoare de spațiu folosind două tehnici de fabricare aditivă, cu șapte specimene în fiecare grup experimental. Specimenele din grupul LCD au fost fabricate utilizând o imprimantă Phrozen Sonic Mini 4K cu două rășini: TC100 Temporary Crown & Bridge Resin și rășina pe bază de soia Anycubic UV. Specimenele din grupul SLA au fost fabricate utilizând o imprimantă Formlabs Form 2 cu două materiale de printare: rășina Next Dent C&B Micro Filled Hybrid și rășina Harz Labs Dental Bleach. În plus, șapte specimene au fost realizate utilizând o tehnică substractivă; acestea au fost frezate din discuri Tempo Block PMMA (culoare D3) cu o mașină de frezat PrograMill PM7 cu 5 axe. Specimenele printate au fost curățate într-o baie de

alcool izopropilic pentru a îndepărta orice reziduu rămas, iar după uscare au fost fotopolimerizate. Specimenele au fost apoi plasate pe un model de studiu fabricat utilizând modelarea prin depunere fuzionată (FDM).

Testele mecanice au fost efectuate utilizând o mașină Zwick/Roell Z 005, care a aplicat o forță constantă pe brațele menținătoarelor de spațiu printr-o tijă de plastic, până la fracturarea specimenelor.

Analiza de varianță univariată (ANOVA) a evidențiat diferențe semnificative din punct de vedere statistic în ceea ce privește forța de rupere la compresiune între tehnicile de fabricare ( $p < 0,001$ ). Forța de rupere la compresiune a crescut progresiv: LCD\_TC100 ( $68,54 \text{ N} \pm 14,15 \text{ N}$ ), SLA\_Harz ( $81,78 \text{ N} \pm 9,50 \text{ N}$ ), SLA\_Next ( $95,52 \text{ N} \pm 13,22 \text{ N}$ ) și, în final, probele frezate ( $199,94 \text{ N} \pm 27,71 \text{ N}$ ). Analiza post-hoc Tukey a evidențiat diferențe semnificative între perechile analizate: grupul frezat a prezentat valori semnificativ mai mari pentru forța de rupere la compresiune față de grupul LCD\_TC100 (diferența medie =  $131,40 \text{ N}$ ,  $p < 0,001$ ), față de grupul SLA\_Harz ( $118,16 \text{ N}$ ,  $p < 0,001$ ) și față de grupul SLA\_Next ( $107,42 \text{ N}$ ,  $p < 0,001$ ). Cu toate acestea, nu s-au constatat diferențe semnificative din punct de vedere statistic între grupurile LCD\_TC100, SLA\_Harz și SLA\_Next.

În faza tratamentului ortodontic activ cu aparate fixe, bracketurile și tuburile vestibulare trebuie să reziste la forțe ocluzale semnificative în timpul masticăției sau în timpul activărilor ortodontice, fără a ceda, în special atunci când aparatele ortodontice sunt colate la nivelul unor restaurări protetice fixe provizorii. Un obiectiv final al acestei teze, prezentat în **subcapitolul 3.3**, a fost evaluarea forței de rupere la forfecare a tuburilor vestibulare colate adeziv de materiale printate 3D pentru coroane provizorii, comparând două materiale de printare și două sisteme adezive. Deși aceste materiale de printare câștigă popularitate în practica actuală, performanțele lor mecanice în aplicații ortodontice nu au fost suficient explorate.

Software-ul MeshInspector a fost utilizat pentru a genera designul final al specimenelor, pe baza unui fișier .stl al unui molar superior stâng.

Specimenele au fost printate utilizând două materiale rășinice: GC Temp PRINT (GC Corporation, Tokyo, Japonia), un compozit fotopolimerizabil pentru printare 3D, fără metacrilat de metil, pentru restaurări provizorii fixe, și V-Print c&b Temp (VOCO GmbH, Cuxhaven, Germania), o rășină fotopolimerizabilă concepută pentru restaurări provizorii estetice de lungă durată. Pentru ambele materiale de printare, toate speci­menele au fost printate conform aceluiași protocol, utilizând o imprimantă 3D MSLA (Original Prusa SL1, Prusa Research, Praga, Republica Cehă). Înainte de fiecare sesiune de printare, imprimanta a fost calibrată pentru a respecta setările de expunere recomandate de producători. Speci­menele au fost aranjate și secționate utilizând software-ul dedicat imprimantei (PrusaSlicer, v2.5.2, Prusa Research, Praga, Republica Cehă). Speci­menele au fost printate utilizând o înălțime a stratului de 0,025 mm (Ultra Detail) și un unghi de printare de 45° pentru a îmbunătăți precizia printării și a minimiza distorsiunile de la nivelul voxelilor. Elementele de suport au fost poziționate pe partea orală a speci­menelor pentru a evita alterarea sau contactul cu suprafețele vestibulare ale molarilor, care au fost desemnate pentru plasarea tuburilor vestibulare. Post-procesarea a inclus spălarea în alcool izopropilic 99% timp de 5 minute, îndepărtarea elementelor de suport, uscarea timp de 15 minute și fotopolimerizarea cu aparatul Prusa CW1 pentru un ciclu de 10 minute.

Un total de 20 de tuburi vestibulare (UL, 0,022 inci Roth, Schnawis) au fost împărțite în patru grupuri egale și au fost colate la nivelul speci­menele printate folosind două sisteme adezive: 3M™ Transbond™ XT (primer și ciment adeziv ortodontic) și un adeziv universal, 3M™ Scotchbond™ Universal Plus, utilizat împreună cu un ciment universal rășinic, 3M™ RelyX™ Universal.

După ce primerul/adezivul a fost aplicat cu un microaplicator pe suprafața vestibulară a speci­menelor timp de 20 de secunde, acesta a fost distribuit uniform și uscat ușor cu ajutorul unui spray cu aer timp de 5 secunde. Cimentul adeziv a fost aplicat direct pe talpa tuburilor vestibulare, care au fost poziționate corespunzător prin centrarea tălpii peste șanțul de descărcare al molarilor, în timp ce marginea ocluzală a tălpii a urmat linia de contact mezo-



distală a molarului. După îndepărtarea excesului, cimentul a fost fotopolimerizat timp de 20 de secunde, 10 secunde dinspre mezial și 10 secunde dinspre distal, folosind o lampă de fotopolimerizare cu LED cu o intensitate a luminii de 1500 mW/cm<sup>2</sup>.

Forța de rupere la forfecare a interfeței adezive dintre tuburile vestibulare și speci­menele printate a fost determinată folosind mașina de testare Mecmesin MultiTest 5-i din cadrul Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor al Universității Politehnica din Timișoara. Viteza de încărcare a fost setată la 5 mm/min. Epruvetele au fost fixate pe o placă metalică verticală fixă folosind un șurub metalic printr-un tunel frezat în mijlocul fiecărei epruvete. O lamă metalică a fost fixată pe brațul mobil al mașinii de testare și a fost plasată în contact cu talpa tuburilor vestibulare, fără a atinge suprafața printată a speci­menelor.

Condițiile experimentale din studiul nostru nu au reprodus în totalitate condițiile din mediul oral sau scenariul clinic al îndepărtării bracketurilor ortodontice. Cu toate acestea, am constatat că toate testele mecanice au dus la fracturarea speci­menelor printate, demonstrând că rezistența adeziunii în cazul ambelor sisteme adezive a depășit rezistența mecanică a materialelor printate (cea mai mare rezistență medie înregistrată în studiul nostru a fost de aproximativ 9,8 MPa pentru materialul de printare V-Print c&b Temp cu sistemul adeziv Transbond™ XT). Nu s-au constatat diferențe semnificative din punct de vedere statistic între forța de rupere la forfecare la compararea celor două tipuri de materiale de printare. La solicitări normale, atât materialele printate 3D, cât și ambele sisteme adezive ar trebui să prezinte proprietăți mecanice adecvate, dar ar putea ceda la forțe masticatorii mari, generate mai ales în timpul parafuncțiilor.

Studiile menționate anterior generează un impact social pozitiv prin contribuția lor la tratamentul, precum și la diagnosticul și prognosticul anomaliilor craniofaciale complexe. Pe măsură ce ortodonția continuă să evolueze, integrarea biomaterialelor și a tehnologiilor de fabricare îmbunătățite va juca un

rol major în furnizarea unei îngrijiri medicale de înaltă calitate, centrate pe pacient.

**Partea finală** a tezei abordează direcțiile viitoare de cercetare:

- analizarea unor eșantioane populaționale reprezentative pentru diferite grupuri etnice și a unei baze de date mai ample de variabile cefalometrice, care ar putea aprofunda mai departe relația dintre pattern-ul scheletal sagital și vertical și morfologia căilor aeriene superioare;
- extinderea cercetării pentru a include și parametrii din planul transversal;
- utilizarea imagisticii CBCT pentru a caracteriza morfologia și volumul căilor aeriene superioare;
- integrarea inteligenței artificiale în practica curentă pentru a facilita aprecierea prognosticului anomaliilor dento-maxilare pe baza parametrilor cefalometrici analizați și a corelațiilor potențiale care se stabilesc între acești parametri;
- dezvoltarea de polimeri îmbunătățiți pentru printarea 3D, cu proprietăți mecanice superioare, adecvate pacienților care dezvoltă forțe masticatorii mari;
- analiza altor factori care ar putea influența proprietățile mecanice ale materialelor printate 3D, cum ar fi timpul crescut de fotopolimerizare (în special pentru materialele de printare destinate printării DLP, dar utilizate împreună cu imprimante LCD), efectul utilizării unor unghiuri de printare diferite și impactul îmbătrânirii materialelor.