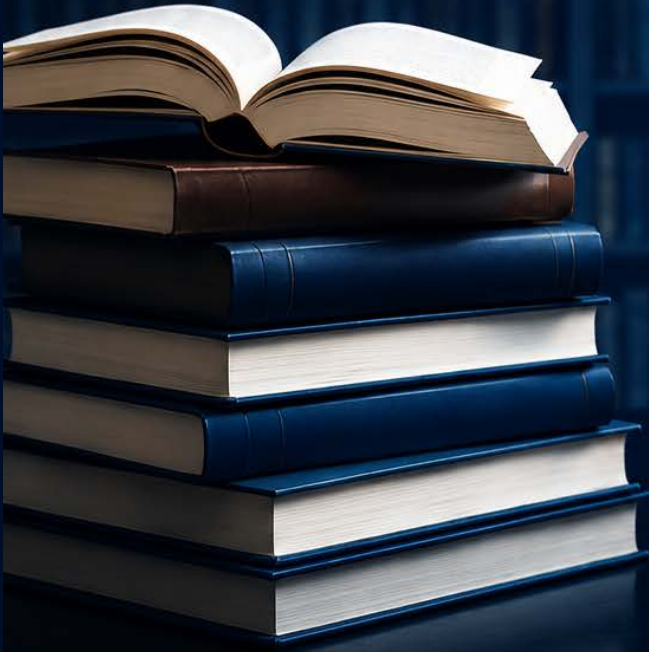


RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİNDE
GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK
DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Simge GÜMÜŞ AYAZ



yaz
yayınları

Restoratif Diş Tedavisinde
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Simge GÜMÜŞ AYAZ

yaz
yayınları

2026

**Restoratif Diş Tedavisi Güncel Konular ve
Akademik Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Simge GÜMÜŞ AYAZ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5450-28-9

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Natural Cross-linking Agents in Adhesive Dentistry.....	1
<i>Simge GÜMÜŞ AYAZ</i>	
Dental Kompozit Kaynaklı Mikro ve Nano Ölçekli Partiküller: Oluşum Mekanizmaları, Biyolojik ve Çevresel Etkiler	21
<i>Muhammet Hilmi KOTAN</i>	
Biogenic Hydroxyapatite: Sources, Synthesis Routes and Applications in Dentistry.....	39
<i>Sevilay KÖSE</i>	
Diş Hekimliğinde Rezin İnfiltrasyon: Güncel Preinsipler ve Klinik Uygulamalar	59
<i>Mine BAŞAN TOSUN, Şevval ÇIRAKÇI KURNAZ</i>	
Çürüksüz Servikal Lezyonlar: Etiyoloji ve Güncel Tedavi Yaklaşımları.....	75
<i>Atiye Tuğba KUZGUN TÜRKMEN</i>	
Kendinden Adeziv Akışkan Rezin Kompozitler: Yapı, Adezyon ve Klinik Kullanım	97
<i>Kerim Safa KUL</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

NATURAL CROSS-LINKING AGENTS IN ADHESIVE DENTISTRY

Simge GÜMÜŞ AYAZ¹

1. INTRODUCTION

Resin–dentin bonding remains one of the most demanding interfaces in restorative dentistry, because the longevity of a bonded restoration depends on the durability of the hybrid layer formed when resin monomers infiltrate acid-etched, demineralized dentin. Complete encapsulation of the collagen fibrils exposed by etching is rarely achieved, particularly at the base of the hybrid layer, where resin infiltration is incomplete. The collagen left uncovered by resin remains vulnerable to hydrolytic and enzymatic breakdown, driven principally by host-derived matrix metalloproteinases (MMPs) and cysteine cathepsins that reside in dentin in a latent state and are activated by the acidic conditions generated during etching and adhesive application. Over months to years this degradation manifests clinically as a progressive loss of bond strength, nanoleakage, marginal breakdown, secondary caries, and eventual restoration failure Liu et al., 2011; Frassetto et al., 2016).

Two complementary biochemical strategies have been proposed to interrupt this process: direct inhibition of the proteolytic enzymes responsible for collagen breakdown, and biomodification of the collagen network itself through cross-linking, which both stiffens the fibrillar scaffold and renders it less accessible to enzymatic attack. Collagen cross-linking agents

¹ Assist. Prof. Dr., Batman University Faculty of Dentistry, Restorative Dentistry, ORCID: 0000-0003-1153-4545.

are generally understood to act through two complementary mechanisms: they promote inter- and intramolecular cross-links that increase the structural integrity of collagen, and they immobilize the catalytic sites of endogenous proteolytic enzymes, thereby limiting collagenolysis at the hybrid layer (Bedran-Russo et al., 2007; Xu & Wang, 2011; Hass et al., 2016).

Synthetic cross-linking agents such as glutaraldehyde and carbodiimide (EDC) have shown clear efficacy in laboratory studies, but their clinical appeal is tempered by cytotoxicity concerns and, in the case of glutaraldehyde, a tendency to cross-link the tissue surface rapidly, forming a barrier that limits penetration into deeper, less accessible layers of demineralized dentin. This limitation has directed sustained interest toward naturally derived cross-linking agents — chiefly plant polyphenols and related bioflavonoids — which combine comparatively low cytotoxicity and good biocompatibility with a demonstrated capacity to stabilize the dentin collagen matrix and, in several cases, to inhibit MMP activity directly (Hass et al., 2016; Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022).

This chapter surveys the principal classes of natural cross-linking agents investigated in adhesive dentistry — proanthocyanidins, tea-derived catechins and theaflavins, dietary flavonoids such as quercetin, naringin, hesperidin and baicalein, and vitamin-derived agents such as riboflavin and α -tocopherol — and synthesizes the in vitro evidence for their effects on immediate and long-term resin–dentin bond strength. (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022). It concludes with a discussion of the clinical and methodological variables that appear to govern their efficacy and the directions in which the field is likely to move.

2. RATIONALE AND MECHANISMS OF ACTION

Dentin is a mineralized connective tissue in which type I collagen fibrils provide the organic scaffold that anchors resin composite restorations once the mineral phase has been partially removed by acid etching. The stiffness of this collagen network falls dramatically once demineralized — from values characteristic of mineralized tissue to only one to three megapascals — a change that increases the mobility of individual collagen peptides and exposes the specific peptide bonds targeted by MMPs. Endogenous pro-MMPs, present in dentin in a dormant state, are activated by the low pH generated by phosphoric acid etching, self-etching primers, and even carious demineralization; once activated they retain the capacity to degrade collagen even after the local pH returns to neutral, which is why bond degradation continues long after the clinical bonding procedure is complete (Liu et al., 2011; Frassetto et al., 2016).

Cross-linking agents interrupt this sequence in two ways. First, by forming covalent, ionic, hydrogen-bonded, or hydrophobic linkages between adjacent collagen molecules, they restrict the unwinding of the triple helix that is required for an MMP to access its cleavage site, without necessarily increasing the tensile strength of intact collagen (Han et al., 2003; Bedran-Russo et al., 2007; Xu & Wang, 2011).. Second, several agents cross-link the proteases themselves, inducing conformational changes in the enzyme structure that reduce the molecular mobility needed for catalytic activity, effectively inactivating the enzyme independently of its interaction with collagen (Hass et al., 2016). Natural polyphenolic cross-linkers such as proanthocyanidins are understood to act mainly through hydrogen bonding between their phenolic hydroxyl groups and the amide carbonyl groups of collagen, supplemented by covalent, ionic, and hydrophobic interactions, while flavonoids such as quercetin have been shown to combine van der Waals, electrostatic,

hydrogen-bonding, and hydrophobic mechanisms in a similar dual role as both a collagen stabilizer and an MMP inhibitör (Han et al., 2003; Hass et al., 2016; Gümüş Ayaz et al., 2025).

3. CLASSES OF NATURAL CROSS-LINKING AGENTS

3.1. Proanthocyanidins

Proanthocyanidins (PAs) are condensed tannins — bioflavonoids composed of catechin and epicatechin monomers of variable chain length — found abundantly in grape seed extract (GSE), pine bark, cranberries, and cocoa seed. Grape seed extract, typically standardized to contain more than 95% proanthocyanidin, is the most extensively investigated natural cross-linker in adhesive dentistry and has been applied at concentrations ranging from roughly 5% to 6.5% for pretreatment periods of one to five minutes (Han et al., 2003; Castellan et al., 2013; Govil et al., 2023).

Across the available comparative and meta-analytic literature, proanthocyanidin/GSE pretreatment consistently improves resin–dentin bond strength relative to untreated dentin, an effect that is preserved and in several analyses becomes more pronounced after aging. A systematic review and meta-analysis restricted to studies aged six months or longer found a statistically significant benefit of PA/GSE pretreatment over control both after six to nine months of aging and after twelve months, with the effect at twelve months (mean difference of roughly fourteen megapascals in favor of PA) exceeding that observed at six to nine months. The same body of evidence concluded that PA/GSE was, to date, the most efficient natural cross-linker identified in the literature for preserving bond strength after aging, outperforming cocoa seed extract, green tea extract, and epigallocatechin gallate, none of which produced a statistically

appreciable improvement once pooled across studies (Anumula et al., 2022).

A separate systematic review and meta-analysis that examined crosslinkers across both natural and synthetic categories reached a comparable conclusion for proanthocyanidins used as a pretreatment primer, reporting improvement in both immediate and long-term bond strength values — a pattern distinct from most other agents in that review, which improved only long-term bond strength. When incorporated directly into the adhesive formulation rather than applied as a separate pretreatment step, however, proanthocyanidin did not improve immediate bond strength, a finding attributed to the relatively large molecular size of proanthocyanidin polymers, which may interfere with the etching efficiency of self-etch primers and impede ideal hybridization (Hardan et al., 2022; Epasinghe et al., 2012; Green et al., 2010).

Cocoa seed extract, another proanthocyanidin source but with a substantially lower proanthocyanidin content (approximately 45% compared with 95% or more for GSE), has not shown a comparable benefit in pooled analyses, reinforcing the impression that the magnitude of bond-strength improvement with proanthocyanidins is concentration- and purity-dependent (Anumula et al., 2022).

3.2. Green Tea Catechins, Epigallocatechin Gallate, and Theaflavin

Green tea extract (GTE) and its principal catechin, epigallocatechin-3-gallate (EGCG), have anti-inflammatory, antimicrobial, antioxidant, and anticollagenolytic properties in addition to a demonstrated capacity to stabilize collagen through hydrogen bonding with galloyl and hydroxyl groups (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022). In a meta-analysis that pooled studies using EGCG as a dentin pretreatment primer, the agent

improved long-term bond strength but not immediate bond strength; a similar long-term-only benefit was observed when EGCG was incorporated within the adhesive formulation itself (Hardan et al., 2022). However, a separate meta-analysis restricted to studies aged six months or more found that neither GTE nor EGCG produced a statistically appreciable improvement in bond strength once results were pooled, a discrepancy plausibly explained by the considerable variation in the concentrations tested across the underlying studies, which ranged from 0.05% to 2% (Anumula et al., 2022).

Theaflavin, a related polyphenol isolated from *Camellia sinensis* (particularly oolong and black tea, in contrast to the unfermented green tea leaves that yield catechins), has been proposed as a newer alternative cross-linker with a lower molecular weight than proanthocyanidin, which is thought to permit faster and deeper dentinal diffusion. A controlled in vitro comparison evaluated 2% theaflavin against 2% proanthocyanidin as dentin pretreatments prior to bonding, testing microtensile bond strength immediately and after thermocycling equivalent to one and three simulated clinical years (Table 1). Both agents produced a large and statistically significant increase in bond strength relative to untreated dentin at every time point. Theaflavin numerically exceeded proanthocyanidin at all three intervals, and this difference reached statistical significance specifically at the one-year interval, an advantage attributed to more complete collagen stabilization afforded by theaflavin's smaller molecular size and correspondingly faster diffusion into the dentin substrate (Perumal et al., 2025).

Table 1. Mean microtensile bond strength values (MPa) for control, 2% theaflavin, and 2% proanthocyanidin dentin pretreatments at immediate, one-year, and three-year simulated intervals, adapted from a comparative in vitro study of natural collagen cross-linking agents.

Group	Immediate (MPa)	1 Year (MPa)	3 Years (MPa)	Trend
Control (no pretreatment)	7.98	10.96	9.57	Lowest at all intervals
2% Theaflavin	36.43	27.13	23.24	Highest at all intervals
2% Proanthocyanidin	35.94	22.39	20.48	Second highest; significantly lower than theaflavin only at 1 year

3.3. Dietary Flavonoids: Quercetin, Naringin, Hesperidin, and Baicalein

Quercetin, a flavonoid abundant in citrus fruits and other plant sources, has attracted growing attention because it functions simultaneously as an MMP-2/-9 inhibitor and as a collagen cross-linker, stabilizing the matrix through van der Waals forces, electrostatic interactions, hydrogen bonding, and hydrophobic interactions (Hass et al., 2016; Gümüş Ayaz et al., 2025). In a comparative in vitro study evaluating dentin pretreatment with chlorhexidine, quercetin, naringin, riboflavin, and α -tocopherol, quercetin produced the highest micro-shear bond strength among all agents tested at twenty-four hours, and after twelve months of thermocycling its mean bond strength rose further, becoming significantly higher than the riboflavin and α -tocopherol groups and than the untreated control, indicating a stable and durable bonding performance sustained through simulated long-term aging (Gümüş Ayaz et al., 2025).

Naringin, a flavanone glycoside found in citrus fruits, grapes, beans, cherries, cocoa, and thyme, combines antimicrobial and antioxidant activity with a proposed cross-linking mechanism involving protonation of anionic regions of the molecule, which increases the likelihood of reaction with

carbonyl and carboxyl groups on collagen (Hass et al., 2016). In the same comparative study, naringin produced the third-highest immediate bond strength, after quercetin and chlorhexidine, and its bond strength increased further after thermal aging, a pattern the authors interpreted as evidence of a genuine, time-dependent cross-linking effect rather than a transient surface interaction (Gümüş Ayaz et al., 2025).

Hesperidin, a glycoside flavonoid with a comparatively low molecular weight and a pronounced hydrophobic character that favors strong association with collagen fibrils, has been shown to preserve dentin collagen and arrest demineralization. In an in vitro study evaluating microtensile bond strength of a self-etch adhesive to dentin contaminated with blood and an aluminum-chloride hemostatic agent, contamination reduced bond strength by roughly half relative to uncontaminated control dentin. Application of 10% hesperidin after contamination restored bond strength to a level statistically indistinguishable from the uncontaminated control, and marginally exceeded the bond strength achieved with 6.5% grape seed extract applied under the same contamination conditions, an advantage attributed to hesperidin's stronger hydrophobic association with collagen fibrils relative to the more hydrophilic proanthocyanidin in GSE (Manihani et al., 2023)

Baicalein, a flavonoid derived from the roots of *Scutellaria baicalensis*, is structurally related to proanthocyanidin and has been proposed to share similar MMP-inhibitory mechanisms (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022). Available baseline (unaged) comparisons uniformly favor baicalein over untreated controls, but because none of the identified studies extended aging beyond several months with the necessary comparative design, its long-term durability relative to other natural cross-linkers has not yet been established through

meta-analysis (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022; Li, 2018; Agarwal, 2023).

3.4. Riboflavin and α -Tocopherol

Riboflavin (vitamin B2) is a photoactivatable cross-linking agent, long used in ophthalmology to stiffen corneal collagen when combined with ultraviolet-A irradiation. Photoactivation disrupts weak intrinsic collagen cross-links and generates reactive oxygen species that in turn promote the formation of new, stronger covalent cross-links, in principle producing a more stable collagen network within the hybrid layer (Fu et al., 2020; Hardan et al., 2022). A meta-analysis of riboflavin used as a dentin pretreatment primer found no significant improvement in immediate bond strength but a significant improvement in long-term bond strength; when incorporated into the adhesive formulation itself, riboflavin again improved only the long-term outcome (Hardan et al., 2022). In a direct comparative study, however, riboflavin produced the lowest immediate micro-shear bond strength among all agents tested, including the untreated control, though its bond strength increased substantially after twelve months of thermal aging — a pattern broadly consistent with the meta-analytic literature and suggestive of a cross-linking benefit that requires time, and potentially a more standardized photoactivation protocol, to become clinically apparent (Gümüş Ayaz et al., 2025).

α -Tocopherol, an active component of vitamin E with recognized antioxidant properties, has been investigated to a more limited extent. In the same comparative study, α -tocopherol produced comparatively high immediate bond strength but a significant decrease in bond strength following thermal cycling, a decline attributed to the possibility that hydrophobic antioxidants of this type disrupt polymerization over time, yielding a more linear, less cross-linked adhesive polymer

structure and consequently reduced long-term bond durability (Gümüş Ayaz et al., 2025).

3.5. Chitosan and Other Biomodifying Agents

Chitosan, a biocompatible, antibacterial polysaccharide with an affinity for amino acids, has occasionally been grouped with natural cross-linking agents because of its ability to form ionic interactions with type I collagen and enhance the stability of the collagen matrix (Hardan et al., 2022). However, meta-analytic pooling of the available evidence demonstrated that chitosan pretreatment did not significantly improve either immediate or long-term resin–dentin bond strength compared with untreated dentin, suggesting that its principal contribution may be related more to its antibacterial and bioactive properties than to effective collagen cross-linking (Hardan et al., 2022).

A related but conceptually distinct body of work has examined natural agents—including rosemary oil, ginger combined with honey or cocoa, and grape seed extract—for their capacity to promote enamel remineralization within pH-cycling caries models rather than to enhance resin–dentin bonding through collagen biomodification. Although the primary outcomes of these studies differ, focusing on enamel surface microhardness and laser fluorescence rather than bond strength, they reinforce the broader concept that naturally derived polyphenols, particularly grape seed extract rich in proanthocyanidins, possess significant biomodifying potential in dental tissues (Gümüş Ayaz et al., 2024). In that study, grape seed extract demonstrated the greatest remineralization potential among the natural agents evaluated, supporting the growing interest in polyphenol-based biomaterials for minimally invasive restorative dentistry (Gümüş Ayaz et al., 2024).

4. COMPARATIVE EVIDENCE FROM BOND STRENGTH STUDIES

4.1. Systematic Reviews and Meta-Analyses

Two independent systematic reviews and meta-analyses provide the most comprehensive synthesis currently available. The first, encompassing forty-five studies evaluating both natural and synthetic collagen cross-linkers, found that when applied as a separate dentin pretreatment primer, proanthocyanidin significantly improved both immediate and long-term resin–dentin bond strength, whereas epigallocatechin-3-gallate (EGCG), carbodiimide (EDC), ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), glutaraldehyde, and riboflavin improved only long-term bond strength. In contrast, chitosan did not significantly improve either immediate or long-term bond strength. When cross-linking agents were incorporated directly into adhesive formulations rather than used as separate pretreatment primers, glutaraldehyde, riboflavin, and EGCG continued to demonstrate improvements in long-term bond strength, whereas proanthocyanidin failed to improve either immediate or long-term outcomes in this application mode (Hardan et al., 2022).

The second meta-analysis, which focused specifically on natural collagen cross-linkers and included only studies with aging periods of at least six months, similarly concluded that grape seed extract/proanthocyanidin was the most effective natural cross-linking agent for preserving resin–dentin bond strength after aging. In contrast, cocoa seed extract, green tea extract, and EGCG did not demonstrate statistically significant improvements in pooled analyses, a finding largely attributed to substantial heterogeneity among studies with respect to cross-linker concentration, adhesive strategy, and aging protocol (Anumula et al., 2022).

4.2. Illustrative Head-to-Head In Vitro Trials

A comparison of 2% theaflavin and 2% proanthocyanidin as dentin pretreatments, evaluated using microtensile bond strength immediately and after simulated one- and three-year thermocycling, demonstrated that both agents significantly outperformed untreated dentin at all evaluation periods. Theaflavin exhibited numerically higher bond strength values throughout the study, with a statistically significant advantage over proanthocyanidin observed after one year of aging (Perumal et al., 2025).

A study using caries-affected dentin compared 6.5% grape seed extract (GSE), 2% green tea extract (GTE), and 5% glutaraldehyde by measuring microshear bond strength following etch-and-rinse (15- and 45-second phosphoric acid etching) and self-etch adhesive strategies. Bond strength ranked GSE > GTE > glutaraldehyde > untreated control, while the 45-second etch-and-rinse protocol yielded significantly higher bond strengths than both the 15-second etching protocol and the self-etch approach, indicating that adhesive strategy influences the effectiveness of collagen cross-linking pretreatments in caries-affected dentin (Govil et al., 2023).

A study simulating clinical contamination with blood and an aluminum chloride hemostatic agent demonstrated that contamination reduced the microtensile bond strength of a self-etch adhesive by approximately 50% compared with uncontaminated dentin. Subsequent application of either 6.5% grape seed extract or 10% hesperidin restored bond strength to levels statistically comparable with uncontaminated controls, with hesperidin producing slightly higher bond strength values than grape seed extract (Manihani et al., 2023).

A comparative study evaluating chlorhexidine, quercetin, naringin, riboflavin, and α -tocopherol as dentin pretreatments

before application of a universal adhesive found that quercetin, chlorhexidine, and naringin achieved the highest immediate microshear bond strengths, all significantly exceeding those obtained with α -tocopherol. Following twelve months of thermocycling, bond strengths increased in the quercetin, riboflavin, and naringin groups, whereas decreases were observed in the control, chlorhexidine, and α -tocopherol groups. These findings suggest that quercetin and naringin may represent promising long-term natural alternatives to chlorhexidine for dentin biomodification (Gümüş Ayaz et al., 2025).

5. FACTORS MODULATING EFFICACY

Several methodological and clinical variables recur across the literature as important determinants of whether natural collagen cross-linking agents improve resin-dentin bond strength and the magnitude of that improvement.

Concentration and molecular weight: The efficacy of natural cross-linkers does not increase linearly with concentration. Grape seed extract has generally demonstrated favorable outcomes when used as a dentin pretreatment at concentrations of 5-6.5%, whereas incorporation of 3% proanthocyanidin directly into adhesive formulations has, in some studies, failed to improve or even reduced bond strength. Lower-molecular-weight agents, such as theaflavin and hesperidin, may diffuse more readily into demineralized dentin than the larger proanthocyanidin polymers, potentially contributing to their favorable performance in direct comparative studies (Epasinghe et al., 2012; Govil et al., 2023; Manihani et al., 2023; Perumal et al., 2025).

Application mode: Applying a collagen cross-linker as a separate dentin pretreatment step before adhesive placement has more consistently enhanced bond strength than incorporating the

same agent directly into adhesive formulations. This distinction is particularly evident for proanthocyanidins, whose relatively large molecular size may interfere with adhesive infiltration or the etching efficiency of self-etch systems when incorporated into the adhesive resin (Epasinghe et al., 2012; Green et al., 2010; Hardan et al., 2022).

Application time: Most studies have employed pretreatment times of approximately one minute or less, which appear sufficient to achieve clinically meaningful improvements in bond durability. Although prolonged application times have been investigated experimentally, the available evidence suggests that extending treatment to much longer periods provides little additional benefit while reducing clinical feasibility (Castellan et al., 2013; Hardan et al., 2022).

Adhesive strategy: The effectiveness of natural cross-linkers may depend on the adhesive protocol. In particular, etch-and-rinse systems, especially when combined with approximately 45 seconds of phosphoric acid etching, have demonstrated superior bond strengths compared with self-etch adhesives in caries-affected dentin. This finding has been attributed to more effective removal of acid-resistant mineral deposits, thereby facilitating resin infiltration and cross-linker penetration into the collagen matrix (Govil et al., 2023).

Substrate condition: Beneficial effects of natural cross-linkers have been demonstrated not only in sound dentin but also in clinically compromised substrates, including caries-affected dentin and dentin contaminated with blood and aluminum chloride hemostatic agents. Under these challenging conditions, cross-linker pretreatment has been shown to substantially recover bond strength relative to untreated controls (Govil et al., 2023; Manihani et al., 2023).

Aging protocol and duration: Artificial aging remains essential when evaluating the durability of resin-dentin bonds. Thermocycling protocols of approximately 10,000 cycles are commonly used to simulate one year of clinical service, whereas 30,000 cycles approximate three years. Several natural cross-linkers—including proanthocyanidins, theaflavin, quercetin, naringin, and riboflavin—demonstrate their greatest benefits after long-term aging rather than immediately after bonding. Conversely, agents such as α -tocopherol may exhibit favorable immediate performance but reduced long-term bond durability, emphasizing the importance of aging protocols in laboratory studies (Anumula et al., 2022; Hardan et al., 2022; Perumal et al., 2025; Gümüş Ayaz et al., 2025).

6. CLINICAL IMPLICATIONS AND FUTURE DIRECTIONS

Collectively, the evidence reviewed in this chapter supports the use of selected natural collagen cross-linking agents—most consistently proanthocyanidins, and increasingly theaflavin, quercetin, naringin, and hesperidin—as clinically feasible, low-cytotoxicity alternatives or adjuncts to chlorhexidine and synthetic cross-linkers such as glutaraldehyde for dentin biomodification prior to adhesive bonding. Their clinical appeal lies in their favorable biocompatibility, relatively short application times (typically approximately one minute), and their ability to preserve resin–dentin bond durability under both normal and compromised bonding conditions, including caries-affected dentin and dentin contaminated with blood or hemostatic agents (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022; Govil et al., 2023; Manihani et al., 2023; Gümüş Ayaz et al., 2025; Perumal et al., 2025).

Despite these promising findings, considerable heterogeneity remains among published studies with respect to cross-linker concentration, solvent composition, application protocol, adhesive strategy, and artificial aging methodology, limiting direct comparison of outcomes and reducing the number of studies suitable for quantitative synthesis (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022). Greater standardization of laboratory protocols—including appropriate sample size calculation, blinded outcome assessment, standardized thermocycling regimens, and aging periods extending to at least twelve months—would facilitate more reliable comparisons between natural cross-linking agents and improve the quality of future evidence.

At present, the available evidence is derived almost exclusively from in vitro studies using microtensile or microshear bond strength testing. Consequently, well-designed randomized clinical trials evaluating restoration survival, marginal adaptation, postoperative sensitivity, and secondary caries incidence following dentin pretreatment with natural cross-linkers remain scarce and should be regarded as a priority for future research (Hardan et al., 2022; Anumula et al., 2022). In addition, incorporation of natural cross-linking agents into commercial universal adhesive systems and the development of nanoparticle-based delivery platforms capable of enhancing the penetration and controlled release of polyphenolic molecules within demineralized dentin represent promising avenues for future investigation (Fu et al., 2020; Hardan et al., 2022).

7. CONCLUSION

Natural cross-linking agents represent a biologically favorable strategy for stabilizing the collagen matrix of the resin–dentin hybrid layer and mitigating the enzymatic degradation that

limits the longevity of adhesive restorations. Proanthocyanidins, principally as grape seed extract, currently hold the strongest and most consistent evidence base for preserving bond strength after long-term aging, while theaflavin, quercetin, naringin, and hesperidin have each shown comparable or, in specific comparisons, superior performance to established agents, including proanthocyanidin and chlorhexidine. Riboflavin and α -tocopherol illustrate that not all naturally derived agents behave uniformly over time, underscoring the importance of long-term aging data when evaluating any candidate cross-linker. As the mechanistic and comparative evidence base matures, natural cross-linking agents are well positioned to become a routine component of dentin biomodification protocols in adhesive dentistry, pending confirmation through standardized in vitro protocols and, ultimately, clinical trials.

REFERENCES

- Agarwal, M., Nagpal, R., Singh, U. P., Mishra, C. C., & Parveen, Y. (2023). Effect of Dentin Biomodification on Resin Dentin Bond Strength. *J Dent*, 10, 101.
- Anumula, L., Ramesh, S., Kolaparthi, V. S. K., Kirubakaran, R., Karobari, M. I., Arora, S., Saleh, A. A., Aldowah, O., Messina, P., & Scardina, G. A. (2022). Role of natural cross linkers in resin–dentin bond durability: A systematic review and meta-analysis. *Materials*, 15(16), 5650.
- Bedran-Russo, A. K. B., Pereira, P. N., Duarte, W. R., Drummond, J. L., & Yamauchi, M. (2007). Application of crosslinkers to dentin collagen enhances the ultimate tensile strength. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 80(2), 268–272.
- Castellan, C. S., Bedran-Russo, A. K., Antunes, A., & Pereira, P. N. R. (2013). Effect of dentin biomodification using naturally derived collagen cross-linkers: One-year bond strength study. *International Journal of Dentistry*, 2013, 918010.
- Epasinghe, D. J., Yiu, C. K. Y., Burrow, M. F., Tay, F. R., & King, N. M. (2012). Effect of proanthocyanidin incorporation into dental adhesive resin on resin–dentine bond strength. *Journal of Dentistry*, 40(2), 173–180.
- Frassetto, A., Breschi, L., Turco, G., Marchesi, G., Di Lenarda, R., Tay, F. R., Pashley, D. H., & Cadenaro, M. (2016). Mechanisms of degradation of the hybrid layer in adhesive dentistry and therapeutic agents to improve bond durability—A literature review. *Dental Materials*, 32(2), e41–e53.
- Fu, C., Deng, S., Koneski, I., Awad, M. M., Akram, Z., Matinlinna, J., Pichika, M. R., Daood, U., & Fawzy, A. S.

- (2020). Multiscale in-vitro analysis of photo-activated riboflavin incorporated in an experimental universal adhesive. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 112, 104082.
- Govil, S. A., Asthana, G., & Sail, V. A. (2023). Bonding strategies to deal with caries-affected dentin using cross-linking agents: Grape seed extract, green tea extract, and glutaraldehyde – An in vitro study. *Journal of Conservative Dentistry*, 26(1), 108–112.
- Green, B., Yao, X., Ganguly, A., Xu, C., Dusevich, V., Walker, M. P., & Wang, Y. (2010). Grape seed proanthocyanidins increase collagen biodegradation resistance in the dentin/adhesive interface when included in an adhesive. *Journal of Dentistry*, 38(11), 908–915.
- Gumus Ayaz, S., Parlak Bakir, E., & Bakir, S. (2024). Evaluation of the effect of current herbal remineralization agents on enamel using different methods. *Cumhuriyet Dental Journal*, 27(3), 158–165.
- Gümüş Ayaz, S., Sonkaya, E., & Keçeci, G. (2025). Comparative analysis of the impact of modern cavity disinfectants on dentin bond strength. *Frontiers in Materials*, 12, 1718129.
- Han, B., Jauregui, J., Tang, B. W., & Nimni, M. E. (2003). Proanthocyanidin: A natural crosslinking reagent for stabilizing collagen matrices. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 65(1), 118–124.
- Hardan, L., Daood, U., Bourgi, R., Cuevas-Suárez, C. E., Devoto, W., Zarow, M., Jakubowicz, N., Zamarripa-Calderón, J. E., Radwanski, M., Orsini, G., & Lukomska-Szymanska, M. (2022). Effect of collagen crosslinkers on dentin bond strength of adhesive systems: A systematic review and meta-analysis. *Cells*, 11(15), 2417.

- Hass, V., Luque-Martinez, I. V., Gutierrez, M. F., Moreira, C. G., Gotti, V. B., Feitosa, V. P., Koller, G., Otuki, M. F., Loguercio, A. D., & Reis, A. (2016). Collagen cross-linkers on dentin bonding: Stability of the adhesive interfaces, degree of conversion of the adhesive, cytotoxicity and in situ MMP inhibition. *Dental Materials*, 32(6), 732–741.
- Li, J., Chen, B., Hong, N., Wu, S., & Li, Y. (2018). Effect of baicalein on matrix metalloproteinases and durability of resin-dentin bonding. *Operative dentistry*, 43(4), 426-436.
- Liu, Y., Tjäderhane, L., Breschi, L., Mazzoni, A., Li, N., Mao, J., Pashley, D. H., & Tay, F. R. (2011). Limitations in bonding to dentin and experimental strategies to prevent bond degradation. *Journal of Dental Research*, 90(8), 953–968.
- Manihani, A. K. D. S., Mulay, S., Beri, L., Tandale, A., Bhawalkar, A., & Dalsania, R. (2023). Comparative evaluation of the effect of two natural collagen cross-linkers on microtensile bond strength of self-etch adhesive system to dentin after contamination with blood and hemostatic agent: An in vitro study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 26(4), 466–471.
- Perumal, S., Varadan, P., & Rajendran, M. R. (2025). Comparative evaluation of two natural collagen-cross linking agents on the long-term microtensile bond strength of composite resin to dentin – An in vitro study. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 15, 905–909.
- Xu, C., & Wang, Y. (2011). Cross-linked demineralized dentin maintains its mechanical stability when challenged by bacterial collagenase. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 96(2), 242–248.

DENTAL KOMPOZİT KAYNAKLI MİKRO VE NANO ÖLÇEKLİ PARTİKÜLLER: OLUŞUM MEKANİZMALARI, BİYOLOJİK VE ÇEVRESEL ETKİLER

Muhammet Hilmi KOTAN¹

1. GİRİŞ

Mikro ve nano ölçekli plastik partiküllerin çeşitli ekosistemlerde yaygın biçimde bulunması, bu maddelerin çevrede uzun süre varlığını sürdürmesi ve insan sağlığına yönelik potansiyel zararları, söz konusu partikülleri çağımızın başlıca çevre ve halk sağlığı sorunlarından biri durumuna getirmiştir (Di Spirito et al., 2025; Šimunović et al., 2025). Kompozit rezinler ve ortodontik apareyler gibi dental polimerik materyaller, ağız ortamındaki mekanik yükler ile termal, enzimatik ve kimyasal etkenlerin etkisiyle zamanla bozunarak mikropplastik salımına neden olabilmektedir (John, Rao, & Srikrishna, 2026). Özellikle kompozit restorasyonların bitirme ve polisaj işlemleri sırasında kullanılan döner aletler, mikro-nano boyutta partikül açığa çıkarabilmektedir. Bu partiküllerin büyük kısmı aspirasyon ile uzaklaştırılsa da atık su aracılığıyla kanalizasyon sistemine ulaşabilmektedir (Mulligan et al., 2022). Bu nedenle, klinik protokollerin standardizasyonu, etkili atık yönetimi uygulamalarının benimsenmesi ve sürdürülebilir materyallerin kullanılması, dental partikül salımının ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayabilir (John et al., 2026; Šimunović et al., 2025). Bu bölümde, dental kompozit kaynaklı mikro-nano

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Aksaray Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0000-5204-3131.

ölçekli partiküllerle ilgili bilgiler derlenerek oluşum süreçleri, olası biyolojik/çevresel etkileri detaylı şekilde incelenecektir.

2. MİKRO/NANOPLASTİKLER VE DENTAL KOMPOZİT KAYNAKLI PARTİKÜLLERİN TANIMI

Mikro ölçekli plastikler genellikle 1 µm ile 5 mm arasında, nano ölçekli plastikler ise 1 µm'den küçük polimerik parçacıklar olarak tanımlanmaktadır (Arif et al., 2024). Buna karşın, "mikropartikül" ve "nanopartikül" terimleri yalnızca parçacık boyutunu ifade eden terimlerdir. Bu nedenle her mikroplastik bir mikropartikül olarak kabul edilirken, her mikropartikül mikroplastik değildir. Kompozit rezinlerden açığa çıkan partiküller; çapraz bağlı metakrilat esaslı polimer matriks ile cam veya silika gibi inorganik doldurucuları birlikte içeren heterojen yapılardır. Mulligan ve ark., bu partiküllerin tek bir polimerden oluşan klasik mikroplastiklerden yapısal olarak ayrıldığını ve bu nedenle aynı şekilde değerlendirilmemesi gerektiğini belirtmiştir (Mulligan et al., 2021). Bu nedenle dental kompozitlerden açığa çıkan yapıları kapsamak üzere “dental kompozit kaynaklı partiküller” terimi kullanılacak; “mikroplastik” ve “nanoplastik” terimleri ise yalnızca polimerik niteliği ortaya konmuş veya ilgili kaynakta bu şekilde tanımlanmış parçacıklar için tercih edilecektir.

3. DENTAL KOMPOZİTLERDEN PARTİKÜL SALIM MEKANİZMALARI

Dental kompozitlerin ağız içindeki ömürleri boyunca maruz kaldıkları mekanik, termal ve kimyasal etkenler (Ghasemzadeh & Gökçe, 2025), materyalden zamanla partikül salımına yol açabilmektedir. Çiğneme sırasında oluşan

tekrarlayan mekanik yükler ile termal değişimler, kompozitin rezin matriksinde ve doldurucu–matriks ara yüzünde mikroçatlaklara ve yapısal bozulmaya yol açabilmektedir (Drummond, 2008; Rinastiti et al., 2010). Bunun yanı sıra, suyun ve asidik çözeltilerin etkisiyle gelişen hidrolitik ve yüzeysel bozunma, yüzey pürüzlülüğünü ve doldurucu partiküllerin açığa çıkmasını artırarak materyal kaybını kolaylaştırabilmektedir (Münchow et al., 2014; Rinastiti et al., 2010). Rutin klinik uygulamalardan olan bitirme ve polisaj işlemleri sırasında önemli miktarda aerosol hâlinde kompozit tozu açığa çıkabilmektedir. Bu tozun akciğerlerin derin bölgelerine ulaşabilecek nano ölçekli partiküller içermesi, söz konusu işlemleri hasta ve dental personel açısından potansiyel bir solunum maruziyeti kaynağı hâline getirmektedir (Iliadi et al., 2020; Kucharska et al., 2025). Dental kompozitlerin klinik uygulamaları sırasında polimerize olmamış materyal artıkları ile bitirme, polisaj ve söküm işlemlerinden kaynaklanan partiküler atıklar oluşabilmektedir. Ayrıca kompozitlerin frezle aşındırılmasının ardından dental atık suda bisfenol A tespit edilmiş; klinik işlemleri taklit eden aşındırma uygulamalarının farklı boyut ve yüzey özelliklerine sahip kompozit mikropartikülleri meydana getirdiği gösterilmiştir (Mulligan et al., 2021; Polydorou et al., 2020). Bu doğrultuda partikül oluşum mekanizmalarının ayrı başlıklar altında incelenmesi, salım süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

3.1. Kullanım Sırasındaki Mekanik Aşınma

Kompozit materyallerin aşınması; dişe ait özellikler, materyal türü, kavite boyutu, oklüzyon fizyolojisi ve karşıt dişlerin özellikleri gibi çok sayıda faktöre bağlı multifaktöriyel bir olgudur. Etki mekanizmasına göre aşınma; abraziv, adeziv, yorulmaya bağlı ve korozyif olmak üzere dört grupta sınıflandırılmaktadır. Klinik koşullarda diş fırçalamanın neden olduğu abraziv aşınma, kompozit rezin restorasyonun açıkta

kalan tüm yüzeylerini etkilerken, oklüzal kuvvetlerden kaynaklanan abrazyon temas yüzeyleriyle sınırlıdır. Ayrıca kompozit rezinlerdeki aşınma, özellikle brüksizm gibi parafonksiyonel aktivitelere sahip hastalarda önemli bir sorun oluşturmaktadır (Dionysopoulos & Gerasimidou, 2021). Doldurucu partiküllerin çevrelerindeki rezin matriksten daha sert olduğu durumlarda, yumuşak matriksin seçici olarak aşınması doldurucuların açığa çıkmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır (Koizumi et al., 2015). Bu süreç, ilerleyen aşınma dönemlerinde mikron ölçekli partiküllerin oluşmasına zemin hazırlayabilir. Özellikle oklüzal yüklerin oluşturduğu tekrarlı stresler, kompozit yüzeyinde mikroçatlakların ilerlemesini hızlandırarak polimer ağının daha hızlı parçalanmasına ve çevre dokulara veya atık sulara karışabilecek mikropartikül yükünün artmasına neden olabilir. Ayrıca, rezin kompozitlerin aşınma özellikleri; doldurucu partiküllerin miktarı, boyutu, şekli ve sertliğinin yanı sıra, doldurucular ile polimer matriks arasındaki bağın niteliğinden ve materyalin üç boyutlu polimerizasyon dinamiklerinden etkilenmektedir (Heintze et al., 2019). Buna ek olarak, çiğneme ortamı sıcaklığındaki artışın kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışlarını etkileyerek sertlik değerlerinde azalmaya ve yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olduğu bildirilmiştir (Yılmaz, 2019).

3.2. Bitirme ve Polisaj İşlemleri

Bitirme ve polisaj işlemleri kompozit dolgu yüzeyinden belirli miktar materyal uzaklaştırabilir ve polimer matriks ile inorganik doldurucuları içeren heterojen mikropartiküller açığa çıkabilir. Fakat bitirme ve polisaj işlemleri, oksijen inhibisyon tabakasının uzaklaştırılması, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması açısından klinik başarı için oldukça önemlidir. Polisaj sırasında organik matriks ile inorganik doldurucu arasındaki sertlik farkı da yüzey topografisini etkilemektedir. Yumuşak olan organik matriks hızlı aşındığında bazı doldurucu partiküller yüzeyde

belirgin hâle gelir, bazıları ise ortamdan ayrılarak mikroskobik boşluklar bırakır (Ölmez & Kisbet, 2013). Bu nedenle, bitirme/polisaj işlemleri partikül oluşumunu etkileyen çok kritik bir basamaktır. Elmas bitirme frezleri, abrasiv diskler veya elmas emdirilmiş lastikler gibi araçlar, kompozit yüzeyini etkileyebilmektedir (Cenker Küçükeşmen et al., 2011). Polisaj işleminin kompozit yüzeyine etkisi, kullanılan tekniğe ek olarak materyalin yapısına bağlı olarak da değişebilmektedir. Nitekim kuru/sulu polisaj yüzey pürüzlülüğünü nanohibrit kompozitler arasında değiştirebilir (Quispe-Pillco et al., 2025). Optimal bitirme/polisaj tekniği, restorasyon başarısı için kritik öneme sahiptir. Yüzey pürüzlülüğünü düzenlemek, restorasyon yüzeyinde bakteri ve plak birikimini azaltabilir; ancak elde edilen yüzeyin özellikleri kullanılan restoratif materyale ve bitirme/polisaj sistemine göre değişmektedir (Aydın & Ozalp, 2021; Nagaş et al., 2017). Bulgular değerlendirildiğinde, bitirme/polisaj protokolleri restorasyonun final kalitesini, yüzeyden organik matriks ve inorganik partiküllerin oluşma potansiyelini etkileyebilir.

3.3. Hidrolitik ve Enzimatik Yaşlanma

Ağız ortamındaki kompozit dolgular, suya maruz kaldığında hidrolitik etkiye uğrayarak, tükürükte bulunan esterazların dolaylı enzimatik degradasyonuna maruz kalabilmektedir. İnsan tükürüğünde kompozit materyali parçalayabilecek seviyede hidrolaz aktivitesi bulunduğu bildirilmiştir (Finer & Santerre, 2004). Ağız içerisindeki kompozit materyal, sıcaklık dalgalanmaları ve su emilimi gibi çevresel etkenlere maruz kalarak yaşlanmaya uğrar ve bu durum materyalin yüzey bütünlüğünü etkileyerek mikrosertliğin azalmasına, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olabilir (Filiz & Erturk-Avunduk, 2025). Özellikle su emme eğilimi olan TEGDMA, rezin matriksin yüzey bozunması ve renklenmesini etkileyebilmektedir (Gündüz Bektaş et al., 2024). Buna ek olarak

ağız gargaraları kompozitlerin mikrosertliğini azaltabilir; asidik içecekler ise kimyasal çözünme ile yüzey pürüzlülüğündeki artışa sebep olabilmektedir (Bulut et al., 2025; Kaplan et al., 2023). Bu bulgular ışığında, ağız ortamındaki hidrolitik, enzimatik ve kimyasal etkiler kompozit yüzeyini zamanla zayıflatarak materyali mekanik aşınmaya ve partikül oluşumuna daha yatkın hâle getirebilir.

3.4. Eski Restorasyonların Sökülmesi ve Tamiri

Kompozit restorasyonların dental frezlerle aşındırılması veya uzaklaştırılması sırasında, büyük bölümü nano boyuttaki partiküllerden oluşan aerosoller açığa çıkmakta ve bu partiküller hem hastanın hem de hekimin solunum bölgesine ulaşabilmektedir (Van Landuyt et al., 2014). Kompozit restorasyonların tamiri veya yenilenmesi sırasında uygulanan frezle pürüzlendirme gibi mekanik yüzey işlemleri, eski ve yeni kompozit arasındaki mikromekanik bağlantıyı ve uzun dönem tamir bağlanma dayanımını etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, kompozit yüzeyinin frezle aşındırılması sırasında solunabilir mikro ve nano ölçekli partiküller de açığa çıkabilmektedir (Camassa et al., 2021; Hadilou et al., 2022). Bu bulgular, restoratif müdahalelerde uygulanan mekanik aşındırma işlemlerinin yalnızca tamir başarısı açısından değil, oluşturabileceği mikro ve nanopartikül maruziyeti bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4. PARTİKÜLLERİN ANALİZİNDE YÖNTEMSEL STANDARDİZASYON SORUNLARI

Mikro ve nano ölçekli partiküllerin güvenilir şekilde belirlenmesi, örneklerin toplanması, bulundukları ortamdan ayrılması, boyut ve morfolojilerinin incelenmesi ile kimyasal bileşimlerinin doğrulanmasını kapsayan çok aşamalı bir analiz sürecini gerektirmektedir. Dental klinik havası ve atık suyundaki

polimer kökenli mikro ve nano ölçekli partiküllerin değerlendirilmesinde kullanılan örnekleme stratejileri, ölçüm birimleri ve karakterizasyon yöntemleri çalışmadan çalışmaya değişmektedir. Bu durum, elde edilen bulguların doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, polimerik parçacıkları inorganik dolduruculardan ayırabilecek kimyasal karakterizasyon yöntemlerinin her çalışmada kullanılmaması, standart analiz ve raporlama yaklaşımlarına duyulan gereksinimi artırmaktadır (Jokstad & Gussgard, 2025). Dental çalışma ortamlarında ölçülen nanopartikül konsantrasyonları, gerçekleştirilen işlemlerin yoğunluğuna ve örnekleme yapılan ortama göre değişmektedir. Bu nedenle klinik ve laboratuvar ortamlarından elde edilen sayı ve kütle konsantrasyonları birbirinden farklı olabilmektedir (Lang et al., 2018). Dental atık sularındaki mikro ve nano ölçekli partiküllerin doğru şekilde karakterize edilebilmesi için yalnızca boyut analizine odaklanmak yeterli değildir. Parçacıkların şekli ve kimyasal içeriği birlikte değerlendirilerek, mevcut analizler farklı klinik şartlarda yapılacak deneylerle desteklenmelidir (Binner et al., 2022; Binner, 2019). Raman ve FTIR spektroskopisiyle elde edilen sonuçlar; lazer dalga boyu, spektral çözünürlük ve veri işleme yöntemlerindeki farklılıklardan kaynaklı olarak her zaman doğrudan karşılaştırılmamalıdır (Jiang et al., 2025). Ayrıca nanoplastikler çok küçük boyuttadır; bu durum, Raman ve FTIR spektroskopisiyle kimyasal tanımlama yapılmasını oldukça zorlaştırmaktadır (Paul et al., 2020). ATR-FTIR analizinde partiküllerin düzensiz yüzey morfolojisi, kristal ile yeterli ve düzgün temas kurulmasını engelleyebilmektedir. Benzer şekilde, pigment, boya ve bozunma ürünleri de floresans oluşturarak, Raman spektrumlarının yorumlanmasını zorlaştırabilir (Lin et al., 2025; Liu et al., 2024).

5. ORAL KAVİTE VE SİSTEMİK ETKİLEŞİMLER

Ağız ortamına salınan nano/submikron boyuta sahip partiküller, tükürük ve yutkunma mekanizması ile GİS'e ulaşarak, bağırsaklarda mukus tabakası ve epitel bariyeri ile etkileşime girebilmektedir. Özellikle nanopartiküllerin bağırsak epitel bariyerini aşarak translokasyon gösterebilme potansiyeli ile birlikte, bu partiküllerin uzun dönem biyolojik ve toksikolojik özellikleri tam anlamıyla açık değildir (De Bruin et al., 2022). Dental işlemler sırasında açığa çıkan ince partiküller solunum maruziyetine neden olarak potansiyel mesleki risk teşkil edebilir. Bununla birlikte, bu partiküllerin sistemik etkileri ve uzun dönem sağlık sonuçlarına ilişkin mevcut kanıtlar sınırlıdır (Ochsmann et al., 2020). Son yıllarda geliştirilen nano-dolduruculu sistemlerde partikül boyutları 0,001 µm mertebesine kadar düşürülebilmektedir (Çetin, 2020). Özellikle bu boyuttaki partiküllerin epitel bütünlüğünü bozmadan derin dokulara ulaşma kapasitelerinin, biyolojik yarı ömürlerinin ve doku reaktivitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. 150 µm ve daha küçük partiküllerin mukozal bariyeri geçebildiği, 1,5 µm'den daha küçük partiküllerin ise daha derin dokulara ulaşabildiği bildirilmektedir (Akçay et al., 2020). Ayrıca, biyolojik ortamda nanopartiküllerin yüzeyinde oluşan protein kılıfının, bu partiküllerin biyoyararlanımını nasıl etkilediği ve oral biyofilmdeki mikroorganizmalar ile pelikül tabakasıyla etkileşimlerinin sonuçları henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır (Besinis et al., 2015). Dental kompozitlerin işlenmesi sırasında açığa çıkan nanopartiküllerin önemli bir kısmı solunabilir fraksiyonda yer almakta ve derin akciğer bölgelerine ulaşabilmektedir. Bu partiküllerin solunması, özellikle solunum sistemi üzerinde potansiyel sağlık riskleri oluşturabileceği gibi, nanopartikül maruziyetinin olası sistemik etkileri konusunda da endişelere yol açmaktadır. Bununla birlikte, mevcut bulguların çoğunlukla in vitro çalışmalara dayanması, kompozit tozunun

uzun dönem sistemik etkilerini ortaya koyacak gelecek çalışmalara ihtiyaç olduğunu düşündürmektedir (Kucharska et al., 2025; Lang et al., 2018).

6. ÇEVRE SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLER

Dental klinik kaynaklı mikro/nanoplastikler, uygun olmayan yollarla bertaraf edildiğinde, atık su yoluyla çevresel kirliliğe katkıda bulunabilir. Bu partiküllerin atık sularda kalıcı olması, sucul organizmalarda birikmesi ve toksik kirleticiler için taşıyıcı görevi görmesi çevresel endişeleri artırmaktadır (Selvaraj et al., 2025). Mikro/nanoplastikler çevreye ulaştıktan sonra, sucul ortamlarda sedimentlere taşınarak kalıcı olabilmekte ve ayrıca bu partiküller trofik transfer yoluyla besin ağı boyunca taşınarak, ekosistem düzeyinde biyolojik etkilere yol açabilmektedir (Huang et al., 2021; Selvaraj et al., 2025). Dental materyallerden açığa çıkan nanometaller/nanopartiküller, dental işlemler sırasında çevreye yayılabildiği için olası biyolojik etkileri nedeniyle daha kapsamlı risk değerlendirmelerine tabi tutulmalıdır. Bu nedenle, nanopartiküllerin maruziyet yolları, toksikolojik etkileri ve güvenli kullanımına yönelik araştırmaların geliştirilmesi kritik öneme sahiptir (Fernandes & França, 2023; Karunakaran et al., 2024). Polimer bazlı kompozitlerden salınan monomerler ve bozunma ürünleri, materyalin degradasyonu ve elüsyonu ile çevreye ulaşarak kirleticiler potansiyel gösterebilmektedir (Mulligan et al., 2022). Bu bağlamda, dental atıkların bertaraf edilme süreci sırasında ortaya çıkan mikroskobik kalıntıların yönetimi, sadece klinik başarı için değil, biyogüvenlik ve ekolojik sürdürülebilirlik için de oldukça önemlidir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, dental materyallerden kaynaklanan mikro/nanoplastiklerin çevresel davranışına, maruziyet yollarına ve uzun dönem ekolojik etkilerine özellikle

odaklanmalı; risklerin etkin biçimde yönetilmesine katkı sunmalıdır.

7. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Sonuç olarak, dental kompozitlerden kaynaklanan mikro/nano ölçekli partiküller, insan sağlığı ve çevre açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Mevcut bulgular, bu partiküllerin oluşum mekanizmalarının, maruziyet yollarının, olası biyolojik ve çevresel etkilerinin derinlemesine araştırılmasına ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Selvaraj et al., 2025). Bu doğrultuda, dental materyallerin geliştirilmesi, daha etkin atık yönetimi stratejileri ve sürdürülebilir klinik uygulamaların yaygınlaşması, diş hekimliğinin geleceği için oldukça önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Akçay, S., Törnük, F., & Yetim, H. (2020). Mikroplastikler: Gıdalarda Bulunuşu ve Sağlık Üzerine Etkileri. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 20, 530-538. <https://doi.org/10.31590/ejosat.725259>
- Arif, Y., Mir, A. R., Zieliński, P., Hayat, S., & Bajguz, A. (2024). Microplastics and nanoplastics: Source, behavior, remediation, and multi-level environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 356, 120618. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120618>
- Aydın, E. G., & Ozalp, N. (2021). Which Finishing And Polishing Technique Is More Effective For Surface Roughness And Microhardness? *Cumhuriyet Dental Journal*, 24(1), 21–29. <https://doi.org/10.7126/CUMUDJ.796652>
- Besinis, A., De Peralta, T., Tredwin, C. J., & Handy, R. D. (2015). Review of Nanomaterials in Dentistry: Interactions with the Oral Microenvironment, Clinical Applications, Hazards, and Benefits. *ACS Nano*, 9(3), 2255–2289. <https://doi.org/10.1021/NN505015E>
- Binner, H., Kamali, N., Harding, M., & Sullivan, T. (2022). Characteristics of wastewater originating from dental practices using predominantly mercury-free dental materials. *Science of The Total Environment*, 814, 152632. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152632>
- Binner, H. (2019). Assessment of the potential environmental impacts arising from mercury-free dental restorative materials. *University College Cork*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/10468/10518>
- Bulut, A., Ahışa, C. D., Bala, O., & Akgül, S. (2025). Üñiversal rezin kompozitlerin mikrosertliği, yüzey pürüzlüñüğü ve

renk değişimi üzerine farklı ağız gargaralarının etkileri. *Acta Odontologica Turcica*, 42(1), 29–35. <https://doi.org/10.17214/GAZIAOT.1451590>

Camassa, L. M. A., Ervik, T. K., Zegeye, F. D., Mdala, I., Valen, H., Ansteinsson, V., & Zienolddiny, S. (2021). Characterization and toxicity evaluation of air-borne particles released by grinding from two dental resin composites in vitro. *Dental Materials*, 37(7), 1121–1133. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.03.011>

Küçükeşmen, H., Küçükeşmen, Ç., Erkut, S., & Doğudatekgezener, M. (2011). DETERMINATION OF SURFACE CONTACT ANGLE OF COMPOSITES AFTER DIFFERENT POLISHING APPLICATIONS. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 1(2), 62–68. <https://izlik.org/JA64JN99RM>

Çetin, A. (2020). In Vitro Koşullarda Farklı İki Nanohibrit Akışkan Kompozitin Derin Class II Kavitelere Mikrosızıntı Açısından Değerlendirilmesi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 12(12), 326–339. <https://doi.org/10.38079/IGUSABDER.825208>

De Bruin, C. R., de Rijke, E., van Wezel, A. P., & Astefanei, A. (2022). Methodologies to characterize, identify and quantify nano- and sub-micron sized plastics in relevant media for human exposure: a critical review. *Environmental Science: Advances*, 1(3), 238–258. <https://doi.org/10.1039/D1VA00024A>

Di Spirito, F., Folliero, V., Di Palo, M. P., De Benedetto, G., Aulisio, L., Martina, S., Rinaldi, L., & Franci, G. (2025). Micro- and Nanoplastics and the Oral Cavity: Implications for Oral and Systemic Health, Dental

- Practice, and the Environment—A Narrative Review. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(9), 332. <https://doi.org/10.3390/jfb16090332>
- Dionysopoulos, D., & Gerasimidou, O. (2021). Wear of contemporary dental composite resin restorations: a literature review. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 46(2). <https://doi.org/10.5395/RDE.2021.46.E18>
- Drummond, J. L. (2008). Degradation, fatigue, and failure of resin dental composite materials. *Journal of Dental Research*, 87(8), 710–719. <https://doi.org/10.1177/154405910808700802>
- Fernandes, A. C. B. C. J., & França, R. (2023). Nanometals and Metal Ion Pollution from Dental Materials in Dental Environment. *Micro* 3,(2), 471–483. <https://doi.org/10.3390/MICRO3020031>
- Filiz, H., & Erturk-Avunduk, A. T. (2025). Impact of different polishing and aging procedures on the surface characteristics of bulk-fill resin composites. *BMC Oral Health*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/S12903-025-07469-Y>
- Finer, Y., & Santerre, J. P. (2004). Salivary esterase activity and its association with the biodegradation of dental composites. *Journal of Dental Research*, 83(1), 22–26. <https://doi.org/10.1177/154405910408300105>
- Ghasemzadeh, M., & Gökçe, Y. B. (2025). Kompozit ve Amalgam Restoratif Materyallerle Yapılan Restorasyonların Ağız İçi Ömrü ve Buna Etki Eden Faktörler. *Türk Diş Hekimliği Araştırma Dergisi*, 4(1), 37–49. <https://doi.org/10.58711/TURKISHJDENTRES.VI.1511218>

- Gündüz Bektaş, G., Duman Özbilgi, Ö., İyibilir, A. F., Berkman, M., Karabay, F., Tuncer, S., Demirci, M., & Tekçe, N. (2024). The Effect of Acidic Beverages on Surface Characteristics of the Alkasite, Bulk-fill, and Universal Resin Composite Restorative Materials. *European Journal of Research in Dentistry*, 8(3), 130-137. <https://doi.org/10.29228/erd.83>
- Hadilou, M., Dolatabadi, A., Ghojzadeh, M., Hosseinifard, H., Alizadeh Oskuee, P., & Pournaghi Azar, F. (2022). Effect of Different Surface Treatments on the Long-Term Repair Bond Strength of Aged Methacrylate-Based Resin Composite Restorations: A Systematic Review and Network Meta-analysis. *BioMed Research International*, 2022, 7708643. <https://doi.org/10.1155/2022/7708643>
- Heintze, S. D., Reichl, F. X., & Hickel, R. (2019). Wear of dental materials: Clinical significance and laboratory wear simulation methods —A review. *Dental Materials Journal*, 38(3), 343–353. <https://doi.org/10.4012/DMJ.2018-140>
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., ... Zhang, Y. (2021). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124187. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124187>
- Iliadi, A., Koletsis, D., Eliades, T., & Eliades, G. (2020). Particulate Production and Composite Dust during Routine Dental Procedures. A Systematic Review with Meta-Analyses. *Materials*, 13(11), 2513. <https://doi.org/10.3390/MA13112513>

- Jiang, F., Gao, C., Chan, A. W. H., Topping, D. O., Zhang, H., Li, W., ... Zheng, Z. (2025). A Review of Atmospheric Micro/Nanoplastics: Insights into Source and Fate for Modelling Studies. *Current Pollution Reports*, 11(1), 53. <https://doi.org/10.1007/S40726-025-00375-5>
- John, K., Rao, A., & Srikrishna, S. B. (2026). Microplastic Release from Dental Materials: Environmental and Biological Implications. *Journal of International Oral Health*, 18(1), 1–6. https://doi.org/10.4103/JIOH.JIOH_166_25
- Jokstad, A., & Gussgard, A. M. (2025). Environmental impacts from intraoral polymer devices: A systematic review. *Dental Materials*, 41(12), 1620–1641. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2025.09.002>
- Kaplan, E., Dündar, A., & Barutçugil, Ç. (2023). Farklı Sıvıların Estetik Kompozitlerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Akdeniz Diş Hekimliği Dergisi*, 2(3), 115–119. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/add/article/1397040>
- Karunakaran, H., Krithikadatta, J., & Doble, M. (2024). Local and systemic adverse effects of nanoparticles incorporated in dental materials- a critical review. *The Saudi Dental Journal*, 36(1), 158–167. <https://doi.org/10.1016/J.SDENTJ.2023.08.013>
- Koizumi, H., Saiki, O., Nogawa, H., Hiraba, H., Okazaki, T., & Matsumura, H. (2015). Surface roughness and gloss of current CAD/CAM resin composites before and after toothbrush abrasion. *Dental Materials Journal*, 34(6), 881–887. <https://doi.org/10.4012/DMJ.2015-177>
- Kucharska, K., Lehmann, A., Ortarzewska, M., Jankowski, J., & Nijakowski, K. (2025). Composite Dust Toxicity Related to Restoration Polishing: A Systematic Review. *Journal*

of Composites Science, 9(2), 90.
<https://doi.org/10.3390/JCS9020090>

- Lang, A., Ovsenik, M., Verdenik, I., Remškar, M., & Oblak, Č. (2018). Nanoparticle concentrations and composition in a dental office and dental laboratory: A pilot study on the influence of working procedures. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 15(5), 441–447. <https://doi.org/10.1080/15459624.2018.1432864>
- Lin, J. T., Chung, Y. P., Lee, Y. Y., Wu, T. L., Huynh, T. T. T., Nguyen, P. T., ... Lin, W. C. (2025). Emerging analytical frontiers in microplastic detection: From spectroscopy to smart sensor technologies. *Talanta Open*, 12, 100514. <https://doi.org/10.1016/J.TALO.2025.100514>
- Liu, Y., Lüttjohann, S., Vianello, A., Lorenz, C., Liu, F., & Vollertsen, J. (2024). Detecting small microplastics down to 1.3 µm using large area ATR-FTIR. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115795. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2023.115795>
- Mulligan, S., Hatton, P. V., & Martin, N. (2022). Resin-based composite materials: elution and pollution. *British Dental Journal*, 232(9), 644–652. <https://doi.org/10.1038/s41415-022-4241-7>
- Mulligan, S., Ojeda, J. J., Kakonyi, G., Thornton, S. F., Moharamzadeh, K., & Martin, N. (2021). Characterisation of Microparticle Waste from Dental Resin-Based Composites. *Materials*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/MA14164440>
- Münchow, E. A., Ferreira, A. C. A., Machado, R. M. M., Ramos, T. S., Rodrigues-Junior, S. A., & Zanchi, C. H. (2014). Effect of Acidic Solutions on the Surface Degradation of a Micro-Hybrid Composite Resin. *Brazilian Dental*

Journal, 25(4), 321–326. <https://doi.org/10.1590/0103-6440201300058>

Çekiç Nagaş, I., Eğilmez, F., Ergün, G., Vallittu, P., & Lassila, L. (2017). Farklı yüzey bitirme ve parlatma uygulamalarının nano-hibrit ve polimer infiltre seramiklerin ışık geçirgenliğine etkisi. *Acta Odontologica Turcica*, 34(3), 98-103. <https://doi.org/10.17214/gaziaot.291767>

Ochsmann, E., Brand, P., Kraus, T., & Reich, S. (2020). Ultrafine particles in scanning sprays: a standardized examination of five powders used for dental reconstruction. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 15(1), 20. <https://doi.org/10.1186/S12995-020-00271-2>

Ölmez, A., & Kisbet, S. (2013). Kompozit rezin restorasyonlarda bitirme ve polisaj işlemlerindeki yeni gelişmeler. *Acta Odontologica Turcica*, 30(2), 115-22. <https://izlik.org/JA76UK39YJ>

Paul, M. B., Stock, V., Cara-Carmona, J., Lisicki, E., Shopova, S., Fessard, V., Braeuning, A., Sieg, H., & Böhmert, L. (2020). Micro- and nanoplastics - current state of knowledge with the focus on oral uptake and toxicity. *Nanoscale advances*, 2(10), 4350–4367. <https://doi.org/10.1039/d0na00539h>

Polydorou, O., Schmidt, O. C., Spraul, M., Vach, K., Schulz, S. D., König, A., Hellwig, E., & Gminski, R. (2020). Detection of Bisphenol A in dental wastewater after grinding of dental resin composites. *Dental materials*, 36(8), 1009–1018. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.04.025>

Quispe-Pillco, A., Bendezu-Quispe, X., Castro-Ramirez, L., Huamani-Echaccaya, J., Rosas-Díaz, J., Ladera-Castañeda, M., & Cayo-Rojas, C. (2025). In vitro

- comparison of the surface roughness of three nanohybrid resin composites before and after dry and wet polishing. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 17(9), e1069–e1076. <https://doi.org/10.4317/JCED.63063>
- Rinastiti, M., Özcan, M., Siswomihardjo, W., & Busscher, H. J. (2010). Effects of surface conditioning on repair bond strengths of non-aged and aged microhybrid, nanohybrid, and nanofilled composite resins. *Clinical Oral Investigations*, 15(5), 625–633. <https://doi.org/10.1007/S00784-010-0426-6>
- Selvaraj, V., Saravanan, R., Vikram, N. R., Gopalakrishnan, U. revathi, & M, R. (2025). Exploring the sources and routes of micro- and nanoplastics from dental products and materials: their impact on human health - a systematic review. *Next Research*, 2(4), 100925. <https://doi.org/10.1016/J.NEXRES.2025.100925>
- Šimunović, L., Bačić, I., & Meštrović, S. (2025). Micro- and Nanoplastics in Dentistry: Challenges in Obtaining High-Quality Evidence. *Materials*, 18(18), 4269. <https://doi.org/10.3390/MA18184269>
- Van Landuyt, K. L., Hellack, B., Van Meerbeek, B., Peumans, M., Hoet, P., Wiemann, M., Kuhlbusch, T. A., & Asbach, C. (2014). Nanoparticle release from dental composites. *Acta biomaterialia*, 10(1), 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.09.044>
- Yılmaz, E. Ç. (2019). Farklı Ortam Sıcaklıklarının Kompozit Restoratif Malzemelerin Mekanik Ve Tribolojik Davranışları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 19(1), 256–263. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.459904>

BIOGENIC HYDROXYAPATITE: SOURCES, SYNTHESIS ROUTES AND APPLICATIONS IN DENTISTRY

Sevilay KÖSE¹

1. INTRODUCTION

Dental hard tissues are apatitic solids. Enamel is approximately 98 wt% inorganic, dentine 72 wt% and cementum 65 wt%, and in each the mineral phase is an apatite rather than a pure chemical compound (Pajor, Pajchel, & Kolmas, 2019). The distinction matters more than it is usually granted. Biological apatite is a carbonated, calcium-deficient hydroxyapatite: carbonate contents of approximately 3.5 wt% in enamel, 4.2 wt% in dentine and 6.0 wt% in bone have been reported, and Ca:P molar ratios in bone span 1.39–1.93 rather than the theoretical 1.67 of the stoichiometric compound (Kono, Sakae, Nakada, Kaneda, & Okada, 2022). A stoichiometric synthetic powder is therefore an approximation of dental mineral, not a replica of it.

Hydroxyapatite is nevertheless used across dentistry as a restorative filler, a remineralizing agent, a graft material and an implant coating, and the nanoscale form has attracted particular attention because its higher specific surface area and solubility more closely reproduce the behaviour of native enamel crystallites (Pajor et al., 2019). Attention has lately turned to biogenic precursors, and the quantities involved are not trivial: roughly 10 million metric tons of eggshell waste were landfilled worldwide in 2024, and more than 10 million tons of molluscan

¹ Research Assistant, Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Dentistry, Department of Restorative Dentistry, ORCID: 0009-0001-3618-0205.

shells are generated annually, over 70% of it from oyster, clam, scallop and mussel processing (Waqar, Ahmed, & Hincke, 2026). Chicken eggshell is approximately 96% calcite with trace magnesium and phosphate, and bivalve shells are 95–99% calcium carbonate with a 1–5% organic fraction (Waqar et al., 2026). Powders derived from such precursors inherit native magnesium, strontium and carbonate, which places them compositionally closer to tooth and bone mineral than purified synthetic material (Wu, Hsu, Wang, Liou, & Ho, 2023; Forero-Sossa et al., 2021).

The aim of this chapter is to evaluate, on the basis of the current literature, the sources and processing routes of biogenic hydroxyapatite and the evidence for its dental use, with emphasis on restorative applications, and to identify the obstacles that separate the laboratory findings from clinical use.

1.1. Significance and Original Contribution of the Study

The significance of this review lies in its joining of two literatures that are usually kept apart. The materials-science literature characterizes biogenic hydroxyapatite in terms of phase purity, crystallinity and trace-element content but rarely follows the powder into a clinical material; the dental literature evaluates hydroxyapatite-containing composites, cements and dentifrices but most often uses commercial synthetic grades whose provenance is not discussed. A recent scoping review concluded that the dental evidence for eggshell-derived hydroxyapatite remains largely in vitro and methodologically heterogeneous (Swarup, Thomas, Rucharitha, Arunkumar, & Vasanthi, 2025). This chapter therefore traces a single causal chain — source, route, powder properties, material performance and clinical outcome — and reads the biogenic literature against the normative documents that would govern its translation.

2. HYDROXYAPATITE: STRUCTURE AND IONIC SUBSTITUTIONS

Biologically relevant hydroxyapatite crystallizes in the hexagonal space group $P6_3/m$ with lattice parameters of approximately $a = 9.43 \text{ \AA}$ and $c = 6.88 \text{ \AA}$; substitution of fluoride for hydroxyl contracts the cell to $a = 9.37 \text{ \AA}$ and lowers solubility while increasing hardness (Pajor et al., 2019). The lattice is unusually tolerant of substitution, and this tolerance is the principal design lever. Cationic substitution at the calcium site contracts the a -axis and expands the c -axis and can depress the Ca/P ratio to 1.33, whereas substitution at the phosphate site can raise it to 1.85; zinc, the most frequently substituted ion, is accommodated only to about 20 atom% (Imran et al., 2024).

The functional consequences are dental rather than merely crystallographic. Fluoride substitution raises crystallinity and lowers solubility, whereas most other substitutions initially reduce crystallinity and thereby increase solubility and bioactivity; reported outcomes include higher microhardness with strontium substitution, optimal micro-tensile bond strength at 0.5% magnesium, and antibacterial activity of silver down to 35 ppb at the cost of black discolouration (Imran et al., 2024). B-type carbonate substitution, the form dominant in dental tissue, shortens the a -axis, lengthens the c -axis and raises both solubility and crystallographic microstrain (Kono et al., 2022). That combination of low crystallinity and carbonate content appears to determine affinity for enamel: in a comparison of four commercial grades, single-application enamel surface coverage ranged from $28.83 \pm 7.35\%$ to $57.20 \pm 33.12\%$ for conventional powders but reached $99.90 \pm 0.12\%$ for a biomimetic zinc-carbonate-substituted hydroxyapatite (Lelli, Foltran, Pucci, & Tarterini, 2025).

3. BIOGENIC SOURCES AND PROCESSING ROUTES

Conversion of carbonate-rich residues to apatite is usually performed between 700 and 1100 °C, with 900 °C the most frequently reported single-stage temperature; on present evidence eggshell-derived materials carry the strongest translational record, while aquatic shell-derived materials remain underexplored (Waqar et al., 2026). Mammalian bone behaves differently because it is already apatitic and requires deproteinization rather than carbonate conversion. In a factorial comparison of bovine and porcine bone processed at 1100 °C for 2 h or at 800 °C for 24 h, hydroxyapatite was the primary phase with magnesium oxide as a secondary phase in every case, but calcium oxide appeared only in the high-temperature samples, whereas the 800 °C route retained more carbonate with both A-type and B-type substitution (Forero-Sossa et al., 2021). Low-temperature deproteinization makes the trade-off explicit: raising the temperature from 100 to 220 °C increased crystallinity from 74.4% to 87% while compressive strength fell from 2.4 ± 1.19 to 0.53 ± 0.29 MPa (Abdelmoneim et al., 2022). The route determines whether a precursor yields a usable apatite at all. Among six wet-chemical protocols using eggshell-derived calcium, unheated routes gave incomplete conversion with persistent intermediate calcium phosphate phases, whereas moderate heating at 70 °C produced approximately 88% hexagonal and 11% monoclinic hydroxyapatite with minimal residual calcium hydroxide (Correa, Pimentel, dos Anjos, Baeta Junior, & Aguilera, 2026). Hydrothermal treatment acts principally on crystallinity and particle growth: room-temperature precipitation gave 25.8% crystallinity and 78 nm particles, while hydrothermal processing at 150 °C raised crystallinity to 44.2% after 1 h and 51.0% after 24 h, at which point particles had grown to 198 nm (Wu et al., 2023). Fish

processing residues follow the same logic: snakehead bone treated by two-step alkaline hydrolysis and calcined at only 550 °C gave a Ca/P ratio falling from 1.78 to 1.71 with crystallinity rising from 31.74% to 39.18% (Dewi et al., 2026). A direct comparison on dentine is instructive: eggshell nano-hydroxyapatite reached 82.19% crystallinity at 11.6 ± 2.7 nm and occluded 78.2 $\pm$ 1.5% of dentinal tubules, whereas fish scale material at 190 ± 81.8 nm occluded 59.7 $\pm$ 1.7%, improving to 72.9 $\pm$ 2.1% after milling ($p < 0.001$) — evidence that particle size and crystallinity, both set by the route, govern the dental outcome more than source identity alone (Mkhize, Onwubu, Mokhothu, Mdluli, & Mishra, 2023).

Table 1 Representative Biogenic Sources of Hydroxyapatite and Reported Powder Characteristics

Source	Representative route	Reported characteristics	Reference
Chicken eggshell	Calcination and wet precipitation at 70 °C	≈88% hexagonal and 11% monoclinic HA; 12–33 nm crystallite	Correa et al. (2026)
Chicken eggshell	Hydrothermal, 150 °C, 1–24 h	Crystallinity 44.2–51.0%; 26.5–40.8 nm crystallite	Wu et al. (2023)
Bovine and porcine bone	Calcination, 800 °C/24 h or 1100 °C/2 h	HA with MgO; CaO only at 1100 °C; more carbonate at 800 °C	Forero-Sossa et al. (2021)
Bovine bone	Deproteinization at 100–220 °C under pressure	Crystallinity 74.4–87%; residual organics up to 14.15%	Abdelmoneim et al. (2022)
Fish bone (Channa striata)	Alkaline hydrolysis and calcination at 550 °C	Ca/P 1.71; crystallinity 39.18%; ≈30 nm crystallite	Dewi et al. (2026)
Fish scale	Acid–alkali treatment and calcination at 700 °C	Ca/P 1.9–2.1; crystallinity 67.5%; 74.6–190 nm particle	Mkhize et al. (2023)

Note: Compiled by the author from the cited studies.

3.1. Characterization and Comparability

A defensible description of a biogenic powder requires complementary methods: X-ray diffraction for phase identification, crystallinity and crystallite size; infrared or Raman

spectroscopy for phosphate, carbonate and hydroxyl band assignment; electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy for morphology and Ca/P ratio; and thermogravimetry for residual organic content. A Ca/P value alone is not discriminating: across four commercial grades the ratio ranged only from 1.55 to 1.69, while carbonate content varied from 2.20% to 6.52% and enamel coverage differed more than threefold (Lelli et al., 2025). Comparability is the deeper problem. ISO 13779-3:2018 prescribes how crystallinity ratio and phase purity are to be determined, and ASTM F1185-23 requires a minimum of 95% hydroxylapatite by quantitative X-ray diffraction for medical-grade material (ASTM International, 2023; International Organization for Standardization, 2018). Crystallinity indices calculated by varying conventions, as is common in the biogenic literature, cannot be read against these acceptance criteria.

4. APPLICATIONS IN RESTORATIVE DENTISTRY

In resin composites, hydroxyapatite is used as a partial filler substitution intended to confer ion release without sacrificing mechanical performance. In experimental BisGMA-based materials containing 2.5–7.5 wt% of micro- (2.5 μm) or nanoparticulate (<200 nm) hydroxyapatite, Vickers hardness and diametral tensile strength increased while the effect on flexural strength was inconsistent; all formulations met the minimum ISO thresholds, and calcium and phosphate release peaked at 5 wt% (Wiertelak-Makala et al., 2026). Higher loadings within a hybrid filler system are feasible: increasing nano-hydroxyapatite from 24.7 to 32 wt% alongside zirconia and glass raised microhardness from 42.16 ± 4.57 to 81.76 ± 4.56 VHN and reduced wear by about 70% (Mirajkar, Winnier, & Hambire, 2023). A

counterexample is equally instructive: hand-spatulated addition of 2 wt% nano-hydroxyapatite to a commercial composite produced a flexural strength lower than that of the unmodified material, indicating that dispersion quality and incorporation method can dominate the compositional effect (Moradaian, Saadat, Agharezaei, & Khorshidi Asl, 2025).

In glass ionomer cements the rationale differs, since the limiting properties are compressive strength and fracture toughness rather than ion release. Nano-hydroxyapatite incorporation has been reported to raise compressive strength and fracture toughness while lowering cytotoxicity and microleakage and increasing fluoride release (Murugan, Yazid, Nasruddin, & Mohamad Anuar, 2022). A hydroxyapatite–chitosan nanocomposite added at 3 wt% in a 70/30 ratio raised compressive strength from 115.02 to 133.44 MPa, and an 85/15 composite at 5 wt% more than doubled shear bond strength to human dentine, from 6.04 to 13.30 MPa, although no inhibition zones were produced against *Streptococcus mutans* (Aref, El-Fallal, El-Farrash, Reicha, & Al-Wakeel, 2026). Hydroxyapatite may also act at the adhesive interface rather than within the bulk: proanthocyanidin-functionalized nanoparticles applied as a dentine pretreatment at 2%, 6.5% and 15% increased 24-hour micro-tensile bond strength and reduced endogenous matrix metalloproteinase activity within the hybrid layer (Enrich-Essvein et al., 2024).

Table 2. Reported Effects of Hydroxyapatite Addition in Restorative Materials

Material system	Form and loading	Principal reported effect	Reference
Experimental BisGMA composite	Micro- (2.5 µm) and nano- (<200 nm), 2.5–7.5 wt%	Higher hardness and diametral tensile strength; inconsistent flexural effect; maximum ion release at 5 wt%	Wiertelak-Makala et al. (2026)
Experimental hybrid-filler composite	Nano-HA 24.7–32 wt% with zirconia and glass	Microhardness 42.2 → 81.8 VHN; wear reduced by ≈70%	Mirajkar et al. (2023)
Commercial composite, hand-mixed	Nano-HA 2 wt%, alone or with 1 wt% AgNP	Flexural strength below unmodified control; dispersion effect dominant	Moradaian et al. (2025)
Conventional glass ionomer cement	Nano-HA	Higher compressive strength and fracture toughness; increased fluoride release	Murugan et al. (2022)
Conventional glass ionomer cement	HA–chitosan nanocomposite, 3–5 wt%	Compressive strength 115.0 → 133.4 MPa; shear bond strength 6.04 → 13.30 MPa	Aref et al. (2026)
Dentine pretreatment before adhesive	Proanthocyanidin-functionalized HA nanoparticles, 2–15%	Higher 24-h micro-tensile bond strength; reduced MMP activity in the hybrid layer	Enrich-Essvein et al. (2024)

Note: Compiled by the author from the cited studies.

4.1. Remineralization, Dentifrices and Dentine Hypersensitivity

The most directly relevant evidence for biogenic material comes from a pH-cycling study in which 105 bovine enamel blocks were treated for 28 days. Surface microhardness recovery was $29.21 \pm 16.47\%$ for a 30% natural nano-hydroxyapatite paste and $27.05 \pm 10.90\%$ for 1100 ppm sodium fluoride, against $9.61 \pm 6.17\%$ for the saliva control, with no significant difference between natural and synthetic hydroxyapatite (Amaechi et al., 2026). Pooled clinical evidence is broadly consistent but more guarded. A meta-analysis of twelve studies found nano-hydroxyapatite superior to fluoride for enamel surface

microhardness (mean difference 9.29; 95% CI [7.74, 10.84]) and mineral gain, but reported no improvement in lesion colour (mean difference -2.76; 95% CI [-6.79, 1.27]; $p = 0.18$), an important caveat where the indication is aesthetic (Alajlan & Baysan, 2024). An earlier review concluded that under demineralizing conditions sodium fluoride hindered mineral loss whereas nano-hydroxyapatite did not, with equivalence demonstrable only under remineralizing conditions and at very low certainty of evidence (Wierichs, Wolf, Campus, & Carvalho, 2022).

In caries prevention, hydroxyapatite toothpaste gave an odds ratio of 2.51 against placebo and 1.1 against fluoride toothpaste, the latter interpreted as non-inferiority (Pawinska et al., 2024). A triple-blind randomized trial in 610 children aged 4–7 followed for 24 months found significant reductions in enamel and dentine lesions in both hydroxyapatite–fluoride and conventional arms, with higher lesion-inactivation rates in the hydroxyapatite–fluoride arm but a between-group difference that did not reach significance (Cocco et al., 2025). For dentine hypersensitivity, pooled data from 44 clinical trials indicated a 39.5% reduction relative to placebo and an additional benefit of approximately 23% over fluoride-based desensitizers (Limeback, Enax, & Meyer, 2023). Several of these syntheses include manufacturer-affiliated authors, which should be declared whenever they are cited. Mechanistically, the activity of zinc–carbonate hydroxyapatite is attributed to non-stoichiometry and surface disorder, which raise solubility and affinity for native mineral (Butera et al., 2023) — properties that biogenic powders possess by construction rather than by design.

4.2. Biological Safety, Antibacterial Function and Regenerative Use

Cytocompatibility data for waste-derived material are encouraging where they exist. Hydroxyapatite synthesized from

chicken eggshell and applied to human dental pulp stem cells gave viabilities of 84.1%, 86.75% and 95.03% at 1%, 2% and 4% respectively, in every case above the 70% threshold of ISO 10993-5 (Elline, Utama, Subrata, Prahasti, & Azman, 2023). Antibacterial function, by contrast, generally requires deliberate ion substitution: silver-doped hydroxyapatite nanorods carrying approximately 1 at% silver gave a minimum inhibitory concentration of 0.165 µg/mL against *Staphylococcus aureus* and inhibited biofilm formation by 96.09% (Elbasuney, El-Sayyad, Radwan, & Correa-Duarte, 2022). It should be stated plainly that such demonstrations use synthetic hydroxyapatite; corresponding evidence for biogenic ion-substituted powders against cariogenic species is presently absent. Substitution can nonetheless be applied to a biogenic backbone: silicate-substituted bovine hydroxyapatite containing 0.8–1.0 wt% silicon, with a Ca/P of 1.63–1.74 and $70.54 \pm 1.14\%$ porosity, raised compressive yield strength from 0.71 to 0.827 MPa and produced a threefold increase in cell number (Ratnayake, Ramesh, Gould, Mucalo, & Dias, 2025). Clinical evidence of a restorative kind is beginning to appear: in a randomized trial of 44 primary molars, eggshell-derived nano-hydroxyapatite achieved 90% clinical success as a pulpotomy medicament at nine months against 85% for amniotic membrane (Shaheen et al., 2025).

5. STANDARDIZATION, REGULATION AND OPEN PROBLEMS

The principal obstacle to translation is not efficacy but consistency. Source and route both shift the phase assemblage of the product, as the appearance of calcium oxide only in high-temperature batches demonstrates (Forero-Sossa et al., 2021), and residual organic content can differ by a factor of six between processing conditions (Abdelmoneim et al., 2022). A material

whose composition varies with the age, species and seasonality of its waste stream cannot straightforwardly satisfy the 95% phase-purity requirement of ASTM F1185-23 (ASTM International, 2023) or be tested reproducibly against ISO 4049:2019 when used as a composite filler (International Organization for Standardization, 2019). Under the sixth edition of ISO 10993-1, materials characterization is an explicit input to the biological safety argument (International Organization for Standardization, 2025) — precisely where variable trace-element content and residual organics make waste-derived material vulnerable. Recent developments in the European Medical Device Regulation have further raised the clinical-evidence and traceability burden for novel biomaterials (Jurczak et al., 2025), and traceability is the weakest link in a waste-derived supply chain.

Four problems therefore remain unresolved. There is no standardized pretreatment and reporting protocol, so crystallinity indices and Ca/P values are not comparable between laboratories. The evidence base in restorative dentistry is dominated by in vitro work, and the clinical syntheses that do exist are frequently manufacturer-funded. The mechanical evidence is contradictory at low filler loadings, with dispersion quality a plausible but insufficiently documented explanation. Finally, and most tellingly for the present subject, almost all composite and cement studies employ commercial synthetic hydroxyapatite, so the performance of biogenic powders in these specific material systems is largely inferred rather than measured.

5.1. Prospective Studies and Future Research Directions

Four lines of work would contribute most to the maturation of the field. The first is the establishment of standardized source-to-powder protocols that declare calcination

regime, residual organic content, trace-element profile and crystallinity determined according to ISO 13779-3:2018, so that batches from different laboratories become comparable. The second is direct head-to-head evaluation of biogenic against synthetic hydroxyapatite within the same restorative formulation and tested under ISO 4049:2019, since the pH-cycling equivalence already demonstrated for dentifrices (Amaechi et al., 2026) has no counterpart for composites or cements. The third is the deliberate exploitation of the native magnesium, strontium and carbonate content of biogenic precursors as a substitution strategy in its own right, rather than doping a purified powder after the fact. The fourth is the generation of machine-readable characterization datasets, without which the materials-informatics workflows now proposed for dental materials development cannot be applied (Yamaguchi, Li, Tichy, Schwendicke, & Imazato, 2025).

6. CONCLUSION

Biogenic hydroxyapatite occupies an unusual position among dental biomaterials in that its principal scientific advantage and its principal regulatory disadvantage share a single origin. The non-stoichiometry, carbonate substitution and native trace-element content that make waste-derived powders biologically attractive are the same features that make them variable, and variability is what standards are designed to exclude. The evidence reviewed here indicates that the material performs at least as well as synthetic hydroxyapatite where the two have been compared directly, that it is cytocompatible, and that it functions plausibly as a filler, a dentine biomodifier and a remineralizing agent — but also that the restorative literature has not yet tested biogenic powders in the material systems where

they would actually be used. On this basis the following priorities may be proposed:

- Establishing standardized pretreatment, characterization and reporting protocols for waste-derived hydroxyapatite, referenced to ISO 13779-3:2018 and ASTM F1185-23.
- Testing biogenic hydroxyapatite directly against synthetic grades within resin composites and glass ionomer cements under ISO 4049:2019.
- Quantifying and controlling residual organic content and trace-element variability as a condition of biological safety evaluation under ISO 10993-1:2025.
- Using the native magnesium, strontium and carbonate content of biogenic sources as a designed substitution strategy rather than an incidental property.

Pursued together, these steps would move biogenic hydroxyapatite from a demonstrated laboratory possibility towards a reproducible and regulable class of restorative material.

REFERENCES

- Abdelmoneim, D., Porter, G. C., Coates, D. E., Duncan, W. J., Waddell, J. N., Hammer, N., & Li, K. C. (2022). The effect of low-processing temperature on the physicochemical and mechanical properties of bovine hydroxyapatite bone substitutes. *Materials*, 15(8), 2798. doi:10.3390/ma15082798
- Alajlan, S., & Baysan, A. (2024). The effect of nano-hydroxyapatite on white spot lesions: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 151, 105402. doi:10.1016/j.jdent.2024.105402
- Amaechi, B. T., Do, M. T., Pawinska, M., Wang, K., Obiefuna, A. C., Farah, R., ... Omosebi, T. O. (2026). Comparison of the caries remineralizing effects of dentifrices based on natural hydroxyapatite, synthetic hydroxyapatite, and fluoride: A pH cycling study. *Biomimetics*, 11(2), 94. doi:10.3390/biomimetics11020094
- Aref, N. S., El-Fallal, A. A., El-Farrash, M. A., Reicha, F. M., & Al-Wakeel, E. E. (2026). Compositional design and formulation study of hydroxyapatite-chitosan nanocomposite-modified conventional glass ionomer cement: Influence of composition and loading on mechanical, interfacial, and antibacterial properties. *BMC Oral Health*, 26(1), 1062. doi:10.1186/s12903-026-08797-3
- ASTM International. (2023). *Standard specification for composition of medical-grade hydroxylapatite for surgical implants* (ASTM F1185-23). Retrieved from <https://store.astm.org/f1185-23.html>
- Butera, A., Maiorani, C., Gallo, S., Pascadopoli, M., Quintini, M., Lelli, M., ... Scribante, A. (2023). Biomimetic action of

- zinc hydroxyapatite on remineralization of enamel and dentin: A review. *Biomimetics*, 8(1), 71. doi:10.3390/biomimetics8010071
- Cocco, F., Salerno, C., Wierichs, R. J., Wolf, T. G., Arghittu, A., Cagetti, M. G., & Campus, G. (2025). Hydroxyapatite-fluoride toothpastes on caries activity: A triple-blind randomized clinical trial. *International Dental Journal*, 75(2), 632–642. doi:10.1016/j.identj.2024.09.037
- Correa, R. D., Pimentel, M. S., dos Anjos, M. J., Baeta Junior, E. de S., & Aguilera, L. dos S. (2026). Sustainable synthesis of biogenic hydroxyapatite from eggshells: Effect of processing conditions and comparative analysis by FTIR, XRD, and SEM. *ACS Omega*, 11(28), 41432–41441. doi:10.1021/acsomega.6c00153
- Dewi, N., Gartika, M., Kurnia, D., Gustiono, D., Herdianto, N., Tasomara, R., ... Triwibowo, B. (2026). Biogenic nanohydroxyapatite derived from *Channa striata* fish bones using alkaline hydrolysis and calcination. *Scientific Reports*, 16(1), 23924. doi:10.1038/s41598-026-53673-3
- Elbasuney, S., El-Sayyad, G. S., Radwan, S. M., & Correa-Duarte, M. A. (2022). Antimicrobial, and antibiofilm activities of silver doped hydroxyapatite: A novel bioceramic material for dental filling. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(12), 4559–4575. doi:10.1007/s10904-022-02459-x
- Elline, E., Utama, J., Subrata, A., Prahasti, A. E., & Azman, S. A. (2023). Cytotoxicity test of chicken eggshell-based hydroxyapatite on human dental pulp cells. *Scientific Dental Journal*, 7(1), 22. doi:10.4103/sdj.sdj_6_23
- Enrich-Essvein, T., González-López, S., Rodríguez-Navarro, A. B., Cifuentes-Jiménez, C., Maravic, T., Mazzitelli, C., ...

- Breschi, L. (2024). Effects of proanthocyanidin-functionalized hydroxyapatite nanoparticles on dentin bonding. *Clinical Oral Investigations*, 28(8), 444. doi:10.1007/s00784-024-05836-7
- Forero-Sossa, P. A., Olvera-Alvarez, I. U., Salazar-Martinez, J. D., Espinosa-Arbelaez, D. G., Segura-Giraldo, B., & Giraldo-Betancur, A. L. (2021). Biogenic hydroxyapatite powders: Effects of source and processing methodologies on physicochemical properties and bioactive response. *Materials Characterization*, 173, 110950. doi:10.1016/j.matchar.2021.110950
- Imran, E., Mei, M. L., Li, K. C., Ratnayake, J., Ekambaram, M., & Cooper, P. R. (2024). Dental applications of ion-substituted hydroxyapatite: A review of the literature. *Dentistry Journal*, 12(10), 304. doi:10.3390/dj12100304
- International Organization for Standardization. (2018). *Implants for surgery — Hydroxyapatite — Part 3: Chemical analysis and characterization of crystallinity ratio and phase purity* (ISO 13779-3:2018). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/64618.html>
- International Organization for Standardization. (2019). *Dentistry — Polymer-based restorative materials* (ISO 4049:2019). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/67596.html>
- International Organization for Standardization. (2025). *Biological evaluation of medical devices — Part 1: Requirements and general principles for the evaluation of biological safety within a risk management process* (ISO 10993-1:2025). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/10993-1>
- Jurczak, K. M., van der Boon, T. A. B., Devia-Rodriguez, R., Schuurmann, R. C. L., Sjollem, J., van Huizen, L., ... van

- Rijn, P. (2025). Recent regulatory developments in EU Medical Device Regulation and their impact on biomaterials translation. *Bioengineering & Translational Medicine*, 10(2), e10721. doi:10.1002/btm2.10721
- Kono, T., Sakae, T., Nakada, H., Kaneda, T., & Okada, H. (2022). Confusion between carbonate apatite and biological apatite (carbonated hydroxyapatite) in bone and teeth. *Minerals*, 12(2), 170. doi:10.3390/min12020170
- Lelli, M., Foltran, I., Pucci, R., & Tarterini, F. (2025). Comparative chemical and physical characterization of biomimetic versus commercial hydroxyapatites for tooth enamel repair. *Biomimetics*, 10(10), 672. doi:10.3390/biomimetics10100672
- Limeback, H., Enax, J., & Meyer, F. (2023). Clinical evidence of biomimetic hydroxyapatite in oral care products for reducing dentin hypersensitivity: An updated systematic review and meta-analysis. *Biomimetics*, 8(1), 23. doi:10.3390/biomimetics8010023
- Mirajkar, C. K., Winnier, J., & Hambire, U. (2023). Effect of nanohydroxyapatite, zirconia and glass filler particles on the wear and microhardness of experimental dental composite resin. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 16(S1), S81–S84. doi:10.5005/jp-journals-10005-2591
- Mkhize, S. C., Onwubu, S. C., Mokhothu, T. H., Mdluli, P. S., & Mishra, A. K. (2023). Comparative assessment of the remineralization characteristics of nano-hydroxyapatite extracted from fish scales and eggshells. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 21, 22808000231180390. doi:10.1177/22808000231180390

- Moradaian, M., Saadat, M., Agharezaei, S., & Khorshidi Asl, Z. (2025). Effect of nanohydroxyapatite and silver nanoparticle incorporation on the flexural strength of resin composites. *BioMed Research International*, 2025(1), 9132555. doi:10.1155/bmri/9132555
- Murugan, R., Yazid, F., Nasruddin, N. S., & Mohamad Anuar, N. N. (2022). Effects of nanohydroxyapatite incorporation into glass ionomer cement (GIC). *Minerals*, 12(1), 9. doi:10.3390/min12010009
- Pajor, K., Pajchel, L., & Kolmas, J. (2019). Hydroxyapatite and fluorapatite in conservative dentistry and oral implantology—A review. *Materials*, 12(17), 2683. doi:10.3390/ma12172683
- Pawinska, M., Paszynska, E., Amaechi, B. T., Meyer, F., Enax, J., & Limeback, H. (2024). Clinical evidence of caries prevention by hydroxyapatite: An updated systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 151, 105429. doi:10.1016/j.jdent.2024.105429
- Ratnayake, J., Ramesh, N., Gould, M. L., Mucalo, M. R., & Dias, G. J. (2025). Silicate-substituted bovine-derived hydroxyapatite as a bone substitute in regenerative dentistry. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 23, 22808000251314302. doi:10.1177/22808000251314302
- Shaheen, S. K. R., Sai Sankar, A. J., Kattimani, V., Sridevi, E., Pranitha, K., & Siva Sankar, K. (2025). Comparative evaluation of eggshell-derived nano-hydroxyapatite and amniotic membrane as pulpotomy agents in primary teeth: A randomized clinical trial. *Journal of Indian Society of Pedodontics and Preventive Dentistry*, 43(2), 276–283. doi:10.4103/jisppd.jisppd_107_25

- Swarup, J. S., Thomas, R., Rucharitha, J., Arunkumar, V. R., & Vasanthi, V. (2025). Eggshell-derived hydroxyapatite as a biomaterial in dentistry: A scoping review of synthesis, properties and applications. *Evidence-Based Dentistry*, 26(3), 153. doi:10.1038/s41432-025-01146-3
- Waqar, S., Ahmed, T. A. E., & Hincke, M. T. (2026). Sustainable valorization of biogenic waste for bone repair and regeneration: A comprehensive review of eggshell and aquatic biomaterials. *Journal of Functional Biomaterials*, 17(8), 417. doi:10.3390/jfb17080417
- Wierichs, R. J., Wolf, T. G., Campus, G., & Carvalho, T. S. (2022). Efficacy of nano-hydroxyapatite on caries prevention—A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 26(4), 3373–3381. doi:10.1007/s00784-022-04390-4
- Wiertelak-Makała, K., Nowak, J., Szczesio-Włodarczyk, A., Wysocki, P., Zimon, A., Szyrkowska-Jóźwik, M. I., ... Bociong, K. (2026). Determination of the properties of an experimental dental composite with addition of hydroxyapatite with varied micro and nano particle size: An evaluation of mechanical properties, ion release, and surface characteristics. *Journal of Functional Biomaterials*, 17(8), 359. doi:10.3390/jfb17080359
- Wu, S.-C., Hsu, H.-C., Wang, H.-F., Liou, S.-P., & Ho, W.-F. (2023). Synthesis and characterization of nano-hydroxyapatite obtained from eggshell via the hydrothermal process and the precipitation method. *Molecules*, 28(13), 4926. doi:10.3390/molecules28134926
- Yamaguchi, S., Li, H., Tichy, A., Schwendicke, F., & Imazato, S. (2025). Materials informatics opens the door for dental

materials development. *Journal of Dental Research*, 104(11), 1165–1170. doi:10.1177/00220345251343610

DIŞ HEKİMLİĞİNDE REZİN İNFİLTRASYON: GÜNCEL PRENSİPLER VE KLİNİK UYGULAMALAR

Mine BAŞAN TOSUN¹

Şevval ÇIRAKÇI KURNAZ²

1. GİRİŞ

Çağdaş diş hekimliğinde temel hedef, dental dokuların korunması ve kayıplarının en erken evrede durdurularak veya geri döndürülerek tedavi edilmesidir. Tarihsel süreçte, kavitasyon göstermeyen başlangıç çürük lezyonlarının yönetiminde sıklıkla kavitasyon oluşana kadar takip edilmesi (watch and wait) ve sonrasında döner aletlerle müdahale edilmesi (drill and fill) stratejisi uygulanmıştır. Ancak güncel restoratif diş tedavisi prensipleri, gereksiz doku kaybını önlemeyi merkeze alan "Minimal İnvaziv Diş Hekimliği" felsefesini benimsemiş ve çürük progresyonunun erken evrede bloke edilmesinin dışın uzun dönem sağkalımı açısından kritik olduğunu vurgulamıştır (McLEAN, 2003).

Başlangıç mine çürükleri histolojik yapısı incelendiğinde, lezyonun en dış yüzeyinde minenin nispeten sağlam (psödo-intakt) ve yüksek mineral içeriğine sahip olduğu, altındaki lezyon gövdesinde ise belirgin bir mineral kaybı ve artmış porözite bulunduğu görülmektedir. Yüzeydeki bu hipermineralize tabaka, florür veya kazein fosfopeptit-amorf kalsiyum fosfat (CPP-ACP)

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Ana Bilim Dalı, ORCID: 0009-0009-9181-6980.

² Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Pedodonti Ana Bilim Dalı, ORCID: 0009-0001-3951-4397.

gibi geleneksel remineralizasyon ajanlarının lezyonun derinliklerine ulaşmasını zorlaştırarak tedavinin etkinliğini sınırlayabilmektedir (Meyer-Lueckel & Paris, 2008).

Non-invaziv koruyucu uygulamalar ile invaziv klasik restoratif işlemler arasındaki tedavi boşluğunu doldurmak amacıyla "rezin infiltrasyon" teknolojisi geliştirilmiştir (Kielbassa, Muller, & Gernhardt, 2009). Bu mikro-invaziv yöntem, yüzeydeki psödo-intakt tabakanın aşındırılmasının ardından, düşük viskoziteli bir rezinin kapiller kuvvetler yardımıyla lezyon gövdesindeki poröz alana infiltre edilmesi esasına dayanır (Paris vd., 2007). İnfiltrate edilen rezinin polimerize olmasıyla, çürük yapıcı bakterilerin asit difüzyon yolları tıkanarak lezyonun ilerlemesi durdurulur (Meyer-Lueckel & Paris, 2008). Bunun yanı sıra, mine içindeki hava ve su boşluklarının resin ile yer değiştirmesi, lezyonun kırılma indeksini sağlıklı mineye yaklaştırarak estetik açıdan başarılı bir optik kamuflaj sağlar (Paris & Meyer-Lueckel, 2009). Sonuç olarak bu teknoloji, başlangıç lezyonlarının yönetimindeki paradigmayı pasif bir bekleyişten, proaktif ve mikro-invaziv bir yaklaşıma dönüştürmüştür.

2. REZİN İNFİLTRASYONUN TEMEL PRENSİBİ VE ETKİ MEKANİZMASI

2.1. Pöröz Mine Yapısına İnfiltrasyon Dinamiği

Başlangıç çürük lezyonlarının tedavisinde resin infiltrasyonun başarısı, büyük ölçüde materyalin poröz mine yapısının derinliklerine kadar ilerleyebilme kapasitesine bağlıdır. Bu ilerleme süreci, temel olarak demineralize mine gövdesindeki mikro-boşlukların oluşturduğu kapiller kuvvetler tarafından yönlendirilir. Kavitasyon göstermeyen bir lezyonda, mine prizmaları arasındaki çözünmüş alanlar adeta ince kapiller tüpler

gibi davranarak uygulanan rezini lezyonun içine çeker (Kidd & Fejerskov, 2004).

Sıvı bir materyalin dar kapiller boşluklara nüfuz etme yeteneği, fizikte Washburn denklemi ile açıklanan "Penetrasyon Katsayısı" (Penetration Coefficient-PC) ile ölçülür. Bir rezin infiltrantın penetrasyon katsayısı; materyalin yüzey gerilimi (surface tension) ve mine yüzeyi ile yaptığı temas açısı (contact angle) ile doğru, dinamik viskozitesi (dynamic viscosity) ile ters orantılıdır (Paris, Meyer-Lueckel, Colfen, & Kielbassa, 2007). Geleneksel rezin kompozit bazlı adezivler ve fissür örtücüler, genellikle yüksek viskoziteleri nedeniyle başlangıç lezyonlarının derinliklerine tam olarak infiltre olamazlar. Bu nedenle, Icon gibi rezin infiltrasyon sistemlerinin içeriği, yüksek oranda Trietilen Glikol Dimetakrilat (TEGDMA) gibi düşük viskoziteli monomerler kullanılarak özel olarak formüle edilmiştir. Yüksek penetrasyon katsayısına (>50 cm/s) sahip bu materyaller, lezyon gövdesine hızlı ve derinlemesine bir şekilde nüfuz ederek poröz ağı üç boyutlu olarak tıkar ve demineralizasyon sürecini mekanik olarak kilitler (Meyer-Lueckel & Paris, 2008).

2.2. Optik İllüzyon ve Kamuflaj Etkisi

Rezin infiltrasyon teknolojisinin kavitasyon göstermeyen başlangıç çürük lezyonlarının prognozunun mekanik olarak iyileştirici temel etkisinin yanı sıra, estetik diş hekimliği uygulamalarında da hızla popülerite kazanmasını sağlayan en önemli faktörlerden biri, demineralize mine yüzeylerinde yarattığı kusursuz "optik kamuflaj" etkisidir (Paris & Meyer-Lueckel, 2009). Özellikle anterior bölgede yer alan, ortodontik tedavi sonrası sıklıkla karşılaşılan ve hastanın gülüş profilini doğrudan bozan beyaz nokta lezyonlarının yönetiminde, geleneksel invaziv kavite preparasyonlarına başvurulmadan elde edilen bu optik illüzyon, yöntemin klinik başarısının en görünür

ve hasta odaklı kanıtını oluşturmaktadır (Denis, Atlan, Vennat, Tirlet, & Attal, 2013).

Beyaz nokta lezyonlarının tebeşirimsi ve opak görünümü, temelde ışığın farklı ortamlardaki kırılma farklılıklarından kaynaklanır (Denis et al., 2013). Sağlıklı mine dokusunun ışık kırılma indeksi (Refractive Index - RI) yaklaşık olarak 1.62'dir. Başlangıç çürük lezyonlarında mineral kaybı sonucu oluşan poröz boşluklar ağız ortamında su (RI = 1.33) veya hava (RI = 1.0) ile doludur. Sağlıklı mine ile içindeki hava/su dolu boşluklar arasındaki bu belirgin kırılma indeksi farkı, dişe gelen ışığın lezyon yüzeyinde saçılmasına (scattering) neden olarak lezyonun mat ve beyaz görünmesine yol açar (Paris & Meyer-Lueckel, 2009).

Rezin infiltrasyon işleminde, lezyon içindeki sıvı önce etanol yardımıyla uzaklaştırılır ve yerine ışık kırılma indeksi yaklaşık 1.46 - 1.52 olan özel formülasyonlu rezin infiltre edilir (Denis et al., 2013). Mikro-boşlukların, kırılma indeksi sağlıklı mineye oldukça yakın olan bu rezin ile doldurulması, ışık saçılmasını dramatik ölçüde azaltır. Işığın doku içinden sağlıklı mineye benzer şekilde geçmesine (translüsensi) olanak tanıyan bu optik illüzyon mekanizması sayesinde, demineralize beyaz alanlar çevredeki sağlıklı dokuyla bütünleşerek gözden kaybolur (Paris & Meyer-Lueckel, 2009)

3. ENDİKASYONLAR VE KONTRENDİKASYONLAR

3.1. Endikasyonlar

Rezin infiltrasyon tekniğinin klinik endikasyonları, temel olarak demineralizasyon kaynaklı edinsel lezyonlar ve gelişimsel mine defektleri olmak üzere iki ana kategoride değerlendirilir.

Yöntem geliştirilirkenki temel amaç, radyografik olarak minede (E1, dış mine; E2, iç mine) veya dentinin dış üçlüsünde (D1) sınırlandırılmış, henüz kavitasyon göstermeyen aproksimal çürük lezyonların tedavisidir (Paris, Hopfenmuller, & Meyer-Lueckel, 2010). Bu bölgelerde uygulanan rezin infiltrasyon, komşu dişin gereksiz preparasyonunu önleyerek çürüğün ilerlemesini başarılı bir şekilde bloke eder.

Bununla birlikte günümüzde en sık karşılaşılan endikasyonların başında pürüzsüz yüzeylerdeki beyaz nokta lezyonları (white spot lesions) gelmektedir. Özellikle sabit ortodontik tedavi gören hastaların braket etrafında gelişen demineralizasyon alanlarının estetik ve biyolojik rehabilitasyonunda, invaziv bir işlem gerektirmeden son derece başarılı kamuflaj sonuçları elde edilmektedir (Knosel, Eckstein, & Helms, 2013). Ayrıca, hafif ve orta dereceli dental florozis, Molar İnsizör Hipomineralizasyonu (MİH) kaynaklı opak lezyonlar ve travmatik hipokalsifikasyonlar gibi gelişimsel mine anomalilerinde de rezin infiltrasyon giderek artan bir sıklıkla minimal invaziv bir estetik tedavi seçeneği olarak kullanılmaktadır (Attal, Atlan, Denis, Vennat, & Tirlet, 2014; Munoz et al., 2013).

3.2. Kontrendikasyonlar

Rezin infiltrasyon materyalleri, yapıları gereği boşluk dolduran geleneksel bir restoratif materyal değildir; mikro-poröziteleri doldurmak üzere tasarlanmış çok düşük viskoziteli ajanlardır. Bu nedenle, mine yüzey bütünlüğünün bozulduğu, yüzeyin çöktüğü veya kavitasyonun olduğu kavitasyonlu çürük lezyonlarında kullanımı kontrendikedir (Kielbassa et al., 2009).

Radyografik olarak dentinin iç veya orta üçlüsüne ilerlemiş (D2, D3) derin dentin çürüklerinde materyalin lezyon tabanına kadar yeterli penetrasyon sağlayamaması nedeniyle tekniğin çürük ilerlemesini durdurmada yetersiz kalacağı

bildirilmiştir; bu vakalarda geleneksel restoratif yaklaşımlar tercih edilmelidir (Meyer-Lueckel & Paris, 2008).

Sistemik veya lokal endikasyon sınırlandırmaları açısından bakıldığında, materyalin ana bileşenlerine (özellikle metakrilat bazlı monomerlere; örn. TEGDMA) karşı bilinen bir alerjisi olan bireylerde uygulanmamalıdır. Ayrıca, şiddetli erozyon veya bruksizm gibi diş yüzeyinde hızlı madde kaybına neden olabilecek parafonksiyonel alışkanlıkları olan hastalarda, infiltre edilmiş ince mine tabakasının kısa sürede aşınma riski bulunduğundan, vaka seçimi dikkatli yapılmalıdır.

4. MATERYAL İÇERİĞİ VE ÖZELLİKLERİ (ICON REZİN İNFİLTRANT SİSTEMİ)

Rezin infiltrasyon sistemi, başlangıç lezyonlarına hücresel düzeyde nüfuz edebilmek üzere birbirini tamamlayan üç temel ajandan oluşmaktadır. İşlemin mikroskopik düzeydeki başarısı, bu ajanların doğru ardışıklıkla ve fiziko-kimyasal rollerine uygun şekilde uygulanmasına bağlıdır (Perdigao, 2020).

4.1. Icon-Etch (Yüzey Erozyon Jeli)

Başlangıç çürük lezyonlarında ve beyaz nokta lezyonlarında yüzeyde bulunan hipermineralize tabaka (psödo-intakt tabaka), rezinin derinlere ulaşmasına engel olan sert bir fiziksel bariyerdir. Geleneksel kompozit rezin uygulamalarında sıklıkla tercih edilen %37'lik fosforik asit (H_3PO_4), bu dirençli tabakayı yeterli derinlikte aşındırmak için yarı kalmaktadır. Bu nedenle İcon rezin infiltrasyon sisteminde, mine yüzeyini yaklaşık 30-40 μm derinliğinde daha etkili bir şekilde eroze ederek altındaki poröz lezyon gövdesini açığa çıkaran %15'lik hidroklorik asit (HCl) jeli kullanılmaktadır (Araujo, Naufel, Alonso, Lima, & Puppim-Rontani, 2015)

4.2. Icon-Dry (Kurutucu ve Yüzey Gerilimi Düşürücü Solüsyon)

Icon-Etch uygulaması sonrasında açığa çıkan demineralize mikro-poröz ağ tamamen su ile doludur. Sistemin bir sonraki aşamasında uygulanacak olan hidrofobik rezinin bu mikroskobik alanlara penetre olabilmesi için suyun etkili bir şekilde elimine edilmesi zorunludur. Setin içerisindeki %99'luk etanol solüsyonu, kapiller boşluklardaki suyun yüzey gerilimini hızla düşürür ve suyu buharlaştırarak dokudan uzaklaştırır (desikasyon). Bu işlem, infiltrantın kapiller kuvvetler yardımıyla çekilmesi için ideal ve nemsiz bir zemin hazırlar (Borges, Caneppele, Masterson, & Maia, 2017).

4.3. Icon-Infiltrant (Düşük Viskoziteli Resin)

Icon-Dry ile suyun uzaklaştırılmasının ardından uygulanan ve sistemin ana yapıtaşı olan infiltrant, geleneksel restoratif materyallere kıyasla olağanüstü düşük viskoziteye ve oldukça yüksek bir penetrasyon katsayısına sahip olan Trietilen Glikol Dimetakrilat (TEGDMA) monomeri ağırlıklı bir rezindir. Geleneksel kompozit resin materyallerinin aksine, kapiller yollarla lezyonun en derin noktalarına kadar ilerleyebilmesi için inorganik doldurucu partiküller içermez veya bu partiküllerin oranı formülasyonda minimal düzeyde tutulmuştur. İçeriğinde, klinik ortamda fotopolimerizasyonu sağlamak amacıyla kamforkinon gibi foto-başlatıcılar yer almaktadır. Düşük viskozitesi sayesinde poröz ağı üç boyutlu olarak sarar ve polimerize olduktan sonra demineralizasyon sürecini mekanik olarak kilitler (Borges et al., 2017; Perdigao, 2020).

5. KLİNİK UYGULAMA PROTOKOLÜ

5.1. İzolasyon (Rubber dam Uygulaması)

Rezin infiltrasyon tekniği, neme ve kontaminasyona karşı son derece hassas bir mikro-invaziv prosedürdür ve uzun dönem klinik başarı için mutlak izolasyon gerektirir. Tükürük, kan veya diş eti oluşu sıvısı kontaminasyonu, materyalin kapiller penetrasyonunu doğrudan engelleyeceği için, uygulamanın rubber dam altında gerçekleştirilmesi tartışmasız bir standart olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, işlem basamaklarında kullanılan %15'lik hidroklorik asidin (HCl) potansiyel yakıcı etkisinden hastayı ve çevre yumuşak dokuları korumak amacıyla da rubber dam izolasyonu bir zorunluluktur (Perdigao, 2020).

5.2. Yüzey Erozyonu (Icon-Etch)

İnfiltrasyon işlemi, lezyon yüzeyindeki hipermineralize (psödo-intakt) tabakanın %15'lik hidroklorik asit jeli ile aşındırılmasıyla başlar. Icon-Etch jeli, lezyon bölgesine yaklaşık 2 dakika boyunca uygulanır ve ardından bol su ile yıkanarak hava ile kurutulur. Özellikle ortodontik tedavi sonrası oluşan derin beyaz nokta lezyonlarında veya dirençli gelişimsel defektlerde, poröz gövdeye tam erişim sağlamak amacıyla bu asitleme ve yıkama aşamasının bir çok kez tekrarlanması gerekebilmektedir (Borges et al., 2017).

5.3. Kurutma (Icon-Dry ile Suyun Uzaklaştırılması)

Asitleme sonrası açığa çıkan mikro-porözitelerin içindeki suyun sistemden tamamen uzaklaştırılması kritik bir basamaktır. Bu amaçla %99'luk etanol solüsyonu 30 saniye boyunca yüzeye uygulanır ve ardından hava sıkılarak kurutulur. Bu aşama, estetik sonucun öngörülmesi açısından hekime önemli bir klinik ön izleme imkanı sunar; etanol uygulandığında lezyonun opak görünümü tamamen kayboluyorsa, rezin infiltrasyonunun estetik

maskeleme başarısı yüksek olacak demektir (Cazzolla, De Franco, Lacaita, & Lacarbonara, 2018).

5.4. Rezin Uygulaması (Icon-İnfiltrant ve Polimerizasyon)

Kurutulan yüzeye düşük viskoziteli rezin infiltrant materyali uygulanır ve kapiller kuvvetlerin rezini derinlere çekebilmesi için ilk aşamada 3 dakika boyunca beklenir. Fazlalıklar bir pamuk pelet veya pamuk rulo yardımıyla uzaklaştırıldıktan sonra materyal 40 saniye boyunca ışıkla polimerize edilir. Polimerizasyon büzülmesini kompanse etmek ve lezyon yüzeyindeki mikro-boşlukların tam olarak tıkanmasını güvence altına almak amacıyla, rezin ikinci kez yüzeye uygulanır, 1 dakika bekletilir ve tekrar 40 saniye ışıkla sertleştirilir (Abbas, Marzouk, & Zaher, 2018).

5.5. Polisaj ve Bitim

İşlemin son aşamasında, polimerize olan yüzeydeki pürüzlülükleri gidermek ve plak retansiyonunu önlemek amacıyla cila işlemi gerçekleştirilir. İlgili yüzeyler, kompozit cila lastikleri, uygun grenli diskler veya aproksimal bölgelerde ince cila stripleri kullanılarak parlatılır. Polisaj işlemi, materyalin uzun dönem renk stabilitesini koruması açısından büyük önem taşımaktadır (Cazzolla et al., 2018; Perdigao, 2020).

6. KLİNİK BAŞARIYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE SINIRLANDIRMALAR

6.1. Lezyonun Derinliği ve Yaşı

Rezin infiltrasyon tekniğinde klinik ve estetik başarımın en temel belirleyicilerinden biri, demineralize lezyonun mine içerisindeki derinliği ve yaşıdır. Yapılan histolojik ve klinik çalışmalar, infiltrant materyalin lezyon gövdesine ne kadar derinlemesine nüfuz edebilirse, çürük durdurucu ve optik

maskeleme etkisinin o oranda arttığını göstermiştir (Paris et al., 2010). Radyografik olarak minenin dış veya orta üçlüsünde yer alan lezyonlarda başarı oranı son derece yüksekken, dentin dokusuna ilerlemiş derin lezyonlarda materyal tam bir koruma sağlayamayabilir. Ayrıca lezyonun yaşı da önemlidir; kronikleşmiş ve dış ortamdan organik pigmentlerle renklenmiş yaşlı lezyonlarda, poröz yapının bir kısmı tıkanmış olabileceğinden infiltrantın penetrasyon kapasitesi düşebilir ve tam bir optik kamuflaj elde etmek zorlaşabilir (Meyer-Lueckel & Paris, 2008; Zawawi & Almosa, 2026).

6.2. Asitleme Tekrarının Etkinliği

İnfiltrasyon başarısını doğrudan etkileyen bir diğer teknik faktör, yüzeydeki hipermineralize tabakanın ne kadar etkin bir şekilde ortadan kaldırıldığıdır. Yüzeydeki bu dirençli tabaka, %15'lik hidroklorik asidin (Icon-Etch) tek başına standart uygulama süresinde (2 dakika) her zaman yeterince erozyona uğratabıyabilir. Özellikle ortodontik tedavi sonrasında gelişen derin ve dirençli beyaz nokta lezyonlarında, asitleme prosedürünün iki veya üç kez tekrarlanması (her defasında 30-120 saniye uygulanıp yıkanması) poröz lezyon gövdesinin açığa çıkmasını kolaylaştırarak rezinin penetrasyon derinliğini ve dolayısıyla estetik maskeleme kalitesini belirgin şekilde artırmaktadır (Dokumacigil, Korkut, & Atali, 2024)

6.3. Renklenmeye Karşı Uzun Dönem Direnç ve Klinik Takip Verileri

Rezin infiltrasyon teknikleri estetik açıdan mükemmel başlangıç sonuçları sunsa da uzun dönemde ağız ortamının dinamik koşullarına (çay, kahve, sigara gibi gıda ve alışkanlıklar) maruz kalması renk stabilitesini tehdit edebilir. İnfiltrant materyal olarak kullanılan TEGDMA bazlı rezinlerin su emilimi (water sorption) ve çözünürlük (solubility) özellikleri, zaman içerisinde kenar renklenmelerine veya yüzeyde mikroskobik düzeyde renk

değişikliklerine yol açabilmektedir (Attal et al., 2014). Ancak uzun süreli klinik takip çalışmaları, doğru endikasyon seçimi ve eksiksiz bir cila (polisaj) protokolü uygulandığında, rezin infiltrasyonunun rengini ve klinik bütünlüğünü yıllar boyunca tatmin edici düzeyde koruyabildiğini kanıtlamıştır (Cazzolla et al., 2018).

7. GELECEK BEKLENTİLERİ VE GÜNCEL EĞİLİMLER

Çağdaş restoratif diş hekimliğinde minimal invaziv felsefenin ve koruyucu yaklaşımların kazandığı ivme, rezin infiltrasyon teknolojisinin sınırlarını sürekli olarak genişletmektedir. Günümüzde klinik başarıları kanıtlanmış olan ticari sistemler, diş dokusunu koruma ve estetik sağlama noktasında devrim niteliğinde adımlar atmış olsa da malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini daha ileri seviyelere taşıyacak yeni çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir (Borges et al., 2017). Mevcut infiltrant yapıların temelini oluşturan TEGDMA bazlı monomerlerin polimerizasyon büzülmesi, zamanla su emilimine bağlı olarak gelişebilecek renklenmeler ve uzun dönem oklüzal aşınma direnci gibi potansiyel dezavantajları, araştırmacıları alternatif formülasyonlar geliştirmeye yöneltmiştir (Veguer, Garot, Manton, & Kerouredan, 2025)

Bu bağlamda gelecek dönemdeki en önemli odak noktalarından biri, infiltrant matris içerisine biyoaktif bileşenlerin, remineralize edici nanodoldurucuların (örneğin nano-hidroksiapatit veya biyoaktif cam) veya antimikrobiyal ajanların entegre edilmesidir. Bu modifikasyonlar sayesinde, mikroskobik poröziteleri tıkamanın ötesinde, çevredeki diş yapısını ikincil çürük ataklarına karşı aktif olarak koruyabilen akıllı rezin sistemlerinin klinik pratiğe kazandırılması hedeflenmektedir.(Kashash et al., 2024) Ayrıca, farklı monomer

oranlarının (örneğin Bis-EMA veya UDMA kombinasyonları) viskozite ve penetrasyon katsayısı üzerindeki sinerjik etkilerini inceleyen deneysel çalışmalar, mekanik direnci artırılmış hibrit infiltrantların sinyallerini vermektedir.

Estetik açıdan ise, özellikle ileri derece renklenmiş uzun süreli var olan lezyonlarda veya derin gelişimsel mine defektlerinde tek seanslık infiltrasyonun yetersiz kalabildiği durumlarda, kombine protokollerin (örneğin mikro-abrazyon veya ev tipi beyazlatma ajanları ile rezin infiltrasyonun eş zamanlı kullanımı) standardizasyonu üzerine yoğunlaşmaktadır. Diğer taraftan, yapay zeka destekli intraoral tarayıcılar ve optik koherens tomografi (OCT) gibi ileri tanı sistemlerinin erken evre demineralizasyonları mikron altı düzeyde tespit etmesi, rezin infiltrasyonunun endikasyon spektrumunu çok daha erken evrelere taşıyacaktır. Yakın gelecekte malzeme bilimi ve dijital diş hekimliğindeki bu teknolojik gelişmeler, rezin infiltrasyonu gelecekte çok daha öngörülebilir, dayanıklı ve geniş kapsamlı bir koruyucu estetik tedavi protokolü haline getirecektir.

8. SONUÇ

Güncel uzun dönemli klinik ve sistematik takip verileri, doğru vaka seçimi, titiz bir rubber dam izolasyonu ve eksiksiz protokol uyumu sağlandığında rezin infiltrasyonunun estetik ve fonksiyonel başarısının yıllar boyunca istikrarlı bir şekilde korunduğunu doğrulamaktadır. Resin infiltrasyon teknolojisi, demineralize mine porözitelerini düşük viskoziteli rezin ile üç boyutlu olarak tıkmak suretiyle çürük progresyonunu mekanik olarak durdururken, sağlıklı mine dokusuyla uyumlu optik kırılma indeksi sayesinde demineralize alanlarda mükemmel bir maskeleme etkisi yaratmaktadır. Bu yöntem, hastaların estetik beklentilerini diş dokusunda herhangi bir kayıp oluşturmaksızın karşılamaktadır. Sonuç olarak bu yaklaşım, minimal invaziv diş

hekimliğinin koruyucu felsefesini en üst düzeyde yansıtan hem biyolojik bütünlüğü destekleyen hem de estetik tatmini en üst seviyeye çıkaran güncel standart bir tedavi protokolü olarak hak ettiği konumu almıştır.

KAYNAKÇA

- Abbas, B. A., Marzouk, E. S., & Zaher, A. R. (2018). Treatment of various degrees of white spot lesions using resin infiltration-in vitro study. *Prog Orthod*, 19(1), 27. doi:10.1186/s40510-018-0223-3
- Araujo, G. S., Naufel, F. S., Alonso, R. C., Lima, D. A., & Puppini-Rontani, R. M. (2015). Influence of Staining Solution and Bleaching on Color Stability of Resin Used for Caries Infiltration. *Oper Dent*, 40(6), E250-256. doi:10.2341/14-290-L
- Attal, J. P., Atlan, A., Denis, M., Vennat, E., & Tirlet, G. (2014). White spots on enamel: treatment protocol by superficial or deep infiltration (part 2). *Int Orthod*, 12(1), 1-31. doi:10.1016/j.ortho.2013.12.011
- Borges, A. B., Caneppele, T. M., Masterson, D., & Maia, L. C. (2017). Is resin infiltration an effective esthetic treatment for enamel development defects and white spot lesions? A systematic review. *J Dent*, 56, 11-18. doi:10.1016/j.jdent.2016.10.010
- Cazzolla, A. P., De Franco, A. R., Lacaita, M., & Lacarbonara, V. (2018). Efficacy of 4-year treatment of icon infiltration resin on postorthodontic white spot lesions. *BMJ Case Rep*, 2018, bcr-2018-225639. doi:10.1136/bcr-2018-225639
- Denis, M., Atlan, A., Vennat, E., Tirlet, G., & Attal, J. P. (2013). White defects on enamel: diagnosis and anatomopathology: two essential factors for proper treatment (part 1). *Int Orthod*, 11(2), 139-165. doi:10.1016/j.ortho.2013.02.014
- Dokumacigil, G., Korkut, B., & Atali, P. Y. (2024). Combined Minimally Invasive Esthetic Rehabilitation of Dental

- Fluorosis-5-year Follow-up: Case Report. *Oper Dent*, 49(5), 497-506. doi:10.2341/23-176-S
- Kashash, Y., Hein, S., Gostemeyer, G., Aslanalp, P., Weyland, M. I., & Bartzela, T. (2024). Resin infiltration versus fluoride varnish for visual improvement of white spot lesions during multibracket treatment. A randomized-controlled clinical trial. *Clin Oral Investig*, 28(6), 308. doi:10.1007/s00784-024-05695-2
- Kidd, E. A., & Fejerskov, O. (2004). What constitutes dental caries? Histopathology of carious enamel and dentin related to the action of cariogenic biofilms. *J Dent Res*, 83 Spec No C(1_suppl), C35-38. doi:10.1177/154405910408301s07
- Kielbassa, A. M., Muller, J., & Gernhardt, C. R. (2009). Closing the gap between oral hygiene and minimally invasive dentistry: a review on the resin infiltration technique of incipient (proximal) enamel lesions. *Quintessence Int*, 40(8), 663-681.
- Knosel, M., Eckstein, A., & Helms, H. J. (2013). Durability of esthetic improvement following Icon resin infiltration of multibracket-induced white spot lesions compared with no therapy over 6 months: a single-center, split-mouth, randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 144(1), 86-96. doi:10.1016/j.ajodo.2013.02.029
- McLEAN, D. M. E. (2003). Minimally invasive dentistry. *The Journal of the American Dental Association*, 134(1), 87-95.
- Meyer-Lueckel, H., & Paris, S. (2008). Improved resin infiltration of natural caries lesions. *J Dent Res*, 87(12), 1112-1116. doi:10.1177/154405910808701201

- Munoz, M. A., Arana-Gordillo, L. A., Gomes, G. M., Gomes, O. M., Bombarda, N. H., Reis, A., & Loguercio, A. D. (2013). Alternative esthetic management of fluorosis and hypoplasia stains: blending effect obtained with resin infiltration techniques. *J Esthet Restor Dent*, 25(1), 32-39. doi:10.1111/j.1708-8240.2012.00527.x
- Paris, S., Hopfenmuller, W., & Meyer-Lueckel, H. (2010). Resin infiltration of caries lesions: an efficacy randomized trial. *J Dent Res*, 89(8), 823-826. doi:10.1177/0022034510369289
- Paris, S., & Meyer-Lueckel, H. (2009). Masking of labial enamel white spot lesions by resin infiltration--a clinical report. *Quintessence Int*, 40(9), 713-718.
- Paris, S., Meyer-Lueckel, H., Colfen, H., & Kielbassa, A. M. (2007). Penetration coefficients of commercially available and experimental composites intended to infiltrate enamel carious lesions. *Dent Mater*, 23(6), 742-748. doi:10.1016/j.dental.2006.06.029
- Perdigao, J. (2020). Resin infiltration of enamel white spot lesions: An ultramorphological analysis. *J Esthet Restor Dent*, 32(3), 317-324. doi:10.1111/jerd.12550
- Veguer, M., Garot, E., Manton, D. J., & Kerouredan, O. (2025). Postoperative Stability of Aesthetic Outcomes Following Resin Infiltration of Hypomineralised and Demineralised Enamel Lesions: A Systematic Review. *J Evid Based Dent Pract*, 25(1), 102052. doi:10.1016/j.jebdp.2024.102052
- Zawawi, R., & Almosa, N. (2026). Cariogenic Enamel Demineralization Prevention, Detection, and Management: A Literature Review. *Eur J Dent*, 20(1), 23-33. doi:10.1055/s-0045-1809179

ÇÜRÜKSÜZ SERVİKAL LEZYONLAR: ETİYOLOJİ VE GÜNCEL TEDAVİ YAKLAŞIMLARI

Atiye Tuğba KUZGUN TÜRKMEN¹

1. GİRİŞ

Diş çürüklerinden sonra ağız boşluğunun 2. en sık patolojisi diş sert doku aşınmalarıdır (Bulut & Türkoğlu, 2018a). Popülasyonun yaklaşık %97'sinde görülen diş aşınması, bakteri etkeni olmaksızın, diş sert dokularında meydana gelen kayıptır (Suchetha 2014). Dişlerde meydana gelen aşınmalar, etiyolojik faktörlere bağlı olarak atrizyon, abrazyon, abfraksiyon ve erozyon şeklinde dört alt gruba ayrılmaktadır (Bulut & Türkoğlu, 2018b).

2. ATRİZYON

Atrizyon, dişlerin doğrudan yabancı bir nesneyle teması olmaksızın, temelde antagonist diş yüzeylerinin birbirine sürtünmesi sonucu gelişen sert doku kaybı şeklinde tanımlanmaktadır (Imfeld, 1996). Diş dokusunda oklüzal veya interproksimal temas alanlarında zamanla beliren bu durum; çiğneme fonksiyonuna bağlı fizyolojik bir aşınma süreci olabileceği gibi brüksizm gibi parafonksiyonel alışkanlıklar, maloklüzyon ya da prematür temaslardan kaynaklanan erken dönem patolojik aşınmalar şeklinde de klinik tabloya yansiyabilir (Terry ve ark., 2003).

¹ Araştırma Görevlisi, Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Bölümü, ORCID: 0009-0003-2184-4173.

Çiğneme gibi fizyolojik süreçlerin doğal bir sonucu olarak geliştiğinden, atrizyon lezyonlarına çoğunlukla oklüzal yüzeylerde, insizal kenarlarda, üst anterior dişlerin lingual ve alt anterior dişlerin labial yüzeylerinde rastlanmaktadır. Bu bölgelerde gözlenen ve faset olarak adlandırılan çukur benzeri aşınma alanları, dişlerin fonksiyonel hareketleriyle doğrudan ilişkilidir. Bunun yanı sıra, anterior bölgeye iletilen kuvvet bileşenleri nedeniyle proksimal yüzeylerde de atrizyon tablosu şekillenebilmektedir. Bu klinik tablo, fonksiyon esnasındaki lateral hareketlerin meydana getirdiği sürtünmeye bağlı sert doku kaybıyla açıklanmaktadır (Eccles & Jenkins, 1974; Gallien ve ark., 1994; Grippo, 1991; Imfeld, 1996).

Atrizyon vakalarında lezyonlar tipik olarak parlak, net sınır gösteren çukurlar şeklinde izlenir ve bu alanlar antagonist dişlerdeki aşınmalarla simetri sergiler (Kaidonis, 2008). Posterior bölgedeki diş kayıpları ise erken temaslara ve oklüzal düzlemin bozulmasına yol açarak atrizyon gelişme riskini belirgin şekilde artırmaktadır (Patano ve ark., 2023). Dişlerin sürekli temas halinde olduğu yüzeylerde zamanla oluşan mine kaybının atrizyon mekanizmasını destekleyebildiği ve bu süreçte abrazyon bileşenlerin de etkili olabileceği ifade edilmektedir. Tüm bu bulgular, çürüksüz servikal lezyonların etiyolojik altyapısının tek bir etkenle sınırlanamayacağını, aksine multifaktöriyel bir çerçevede değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Imfeld, 1996).

3. ABRAZYON

Abrazyon, diş kaynaklı mekanik etkenlerin ve çeşitli parafonksiyonel alışkanlıkların diş sert dokularında oluşturduğu kayıplar olarak tanımlanmaktadır (Imfeld, 1996). Süreç, diş yüzeyine sürekli temas eden yabancı cisimlerin oluşturduğu sürtünme kuvvetleri neticesinde gelişir. Bu yabancı etkenler

yalnızca diş fırçası veya diş macunlarıyla sınırlı kalmayıp, gün içinde tüketilen besinlerin mekanik etkilerini de kapsamaktadır. Diyetle alınan besinler genellikle oklüzal yüzeyin tamamına yayılan geniş aşınma alanları oluşturmakta; bu niteliğiyle atrizyonun karakteristik özelliği olan net sınırlı ve çukur formundaki fasetlerden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır.

Atrizyona kıyasla abrazyona maruz kalan ve açığa çıkan dentin dokusu, yüzeyde oyulmuş bir morfoloji sergileme eğilimindedir. Erozyon lezyonları ile karşılaştırıldığında ise abrazyon kaynaklı dentin defektleri daha yüzeyel kalmakta ve derinlik-genişlik oranı belirgin bir kararlılık göstermektedir; bireyin beslenme alışkanlıklarında radikal bir değişim yaşanmadığı sürece bu oran korunmaktadır (Bell ve ark., 1998; Murray & Sanson, 1998).

Abrazyon lezyonlarının etiyopatofizyolojisinde çoğunlukla hastaya özgü faktörler rol oynamakta ve hatalı diş fırçalama alışkanlıkları ana etiyolojik etken olarak kabul edilmektedir (Ceruti ve ark., 2006; Litonjua ve ark., 2003). Çürüksüz servikal abrazyona sahip bireylerin klinik incelemelerinde sıklıkla yüksek oral hijyen standartlarına sahip oldukları göze çarpmaktadır. Bu klinik tablo; yanlış fırçalama teknikleri, diş macununun aşındırıcılık (abrazivlik) derecesi, fırçalama süresi, diş fırçasının sertlik derecesi, kıl tasarımı ve fırçalama esnasında uygulanan aşırı mekanik kuvvete bağlı olarak şekillenebilmektedir (Imfeld, 1996). Bunun yanı sıra, interdental alanlarda gözlenen sert doku kayıplarının diş ipi, kürdan ve arayüz fırçası gibi hijyen araçlarının uygunsuz veya aşırı kuvvetle kullanımı sonucunda gelişebileceği bildirilmektedir (Sarode & Sarode, 2013).

Mesleki zorunluluklar ve bireysel alışkanlıklar da abrazyon etiyolojisinde önemli birer risk faktörüdür. Örneğin üflemler müzik aletlerinin (flüt vb.) uzun süreli dişler arasında

tutulması veya marangoz ve terzilerin çalışma esnasında ağızlarında çivi, iğne gibi objeleri sabitlemesi abrazyon gelişimini tetikleyebilmektedir. Benzer şekilde tırnak yeme, çekirdek çitleme ve pipo kullanımı gibi parafonksiyonel davranışlar da etkenler arasında yer almaktadır (Boushell ve ark., 2019; El Aidi ve ark., 2011). Tüm bu mekanik etkenlerin yanı sıra, erozyon ve abfraksiyon gibi diğer kofaktörlerin de lezyonun ilerlemesinde sinerjik rol oynayabileceği unutulmamalıdır (Davies ve ark., 2002; Smith & Knight, 1984).

Abrazyonun klinik tablosu; etiyolojik etkenin türüne ve şiddetine bağlı olarak, bir veya birden fazla dişin fasiyal yüzeyinde konumlanan "V" şeklindeki çentik benzeri lezyonlarla karakterizedir. Bu lezyonlar, belirgin/keskin kenar sınırları ve pürüzsüz yüzey morfolojisi ile dikkat çeker (Davies ve ark., 2002; Litonjua ve ark., 2003). Çiğneme hareketlerinin genliği arttıkça, aşınmanın en derin noktasının alt dişlerde bukkal, üst dişlerde ise palatinal yüzeylerde yoğunlaştığı izlenmektedir. Kaşık benzeri bir formda oyulmuş olan bu dentin yüzeylerinin sıklıkla dentin hassasiyeti sergilememesi, dentin tübüllerini tıkayan mekanik bir smear tabakasının varlığıyla açıklanmaktadır. Her ne kadar bu tür smear tabakalarının döner alet kullanımı sırasında oluştuğu kabul edilse de çiğneme esnasında meydana gelen mekanik etkileşimlerin de benzer bir tübüler tıkanma yüzeyi oluşturabildiği gösterilmiştir (Ingelbrecht ve ark., 2024; Richards & Miller, 1991).

4. ABFRAKSİYON

Abfraksiyon, oklüzal yüklenmeler ve parafonksiyonel aktiviteler esnasında dişe iletilen lateral kuvvetlerin, özellikle servikal bölgede gerilme (tensile) stresleri odaklaması neticesinde geliştiği kabul edilen mikromekanik bir sert doku kaybı türüdür. Grippo tarafından 1991 yılında dişin fleksural

esnemesi sonucu meydana gelen minesement birleşimindeki mikro kırıklar ve bunun sonucunda oluşan sert doku kaybı olarak ifade edilmiştir (Grippio, 1991). Mine dokusu basma (kompresyon) kuvvetlerine karşı belirgin bir direnç sergilemesine karşın, gerilme kuvvetlerine karşı son derece kırılgandır. Oklüzal streslerin indüklediği bu çekme kuvvetleri, mine ve dentin matrisindeki hidroksiapatit kristallerinde mikroçatlakların belirmesine ve organik-inorganik bağ yapıların zayıflamasına zemin hazırlar. Yapısal özellikleri gereği mine-sement birleşimi, söz konusu gerilme Streslerinin yıkıcı etkisine en açık anatomik alanların başında gelmektedir (Barbour & Rees, 2006; Patano ve ark., 2023).

Literatür incelendiğinde; dişe ulaşan lateral kuvvetlerin yönü, büyüklüğü ve uygulama süresinin abfraksiyon lezyonlarının anatomik lokalizasyonunu ve geometrik boyutunu doğrudan etkilediği gösterilmiştir. Buna karşın, abfraksiyonun birincil ve tek etiyolojik faktörünün oklüzal yükler olduğunu kanıtlayacak veriler güncel literatürde halen tartışmalı bir zeminedir (Grippio ve ark., 2012; Lee ve ark., 2002).

Güncel biyomekanik yaklaşımlar; dişin uzun eksenine paralel iletilmeyen karmaşık kuvvet kombinasyonlarının (çekme, basma, eğilme/fleksür) servikal bölgede mikroskobik çatlak hatları oluşturduğunu ve zamanla belirgin sınırlı sert doku kayıplarını tetiklediğini kabul etmektedir (Silva ve ark., 2013).

Servikal bölgede şekillenen abfraksiyon lezyonları, klinik incelemelerde en sık dişlerin labial ve bukkal yüzeylerinde konumlanmakta; karakteristik olarak kama (wedge-shaped) veya "V" formunda, keskin sınırlı defektler olarak izlenmektedir (Leinfelder, 1994; Levitch ve ark., 1994). Bu morfolojik nitelikler abrazyon lezyonları ile büyük ölçüde benzerlik gösterdiğinden, iki klinik tablonun ayırt edilmesi güçleşebilmektedir. Ancak bazı abfraksiyon lezyonlarının subgingival bölgeye (dişeti sınırının

altına) kadar uzanabilmesi, abrazyondan ayrılmasında kritik bir diagnostik kriter sağlar. Lezyonun subgingival lokalizasyonu, gelişim sürecinde salt mekanik etkenlerin değil, biyolojik ve biyokimyasal faktörlerin de işe karıştığını düşündürmektedir. Tabloya erozyon veya abrazyon gibi ekzojen aşındırıcı etkenlerin eklenmesi halinde ise abfraksiyon kenarları keskinliğini kaybederek daha yuvarlak, sıg ve çanak/tabak şeklinde bir morfolojiye evrilebilmektedir (Davies ve ark., 2002; Rees ve ark., 2003).

5. EROZYON

Dental erozyon, diş sert dokularının bakteriyel kökenli olmayan (mikroorganizma içermeyen) asidik kimyasal ajanların etkisiyle gerçekleşen irreversibl kaybı olarak tanımlanmaktadır (Eccles & Jenkins, 1974).

Erken evre demineralizasyon süreci; mine prizmalarının merkezindeki (çekirdek) yapının veya interprizmatik alanların çözünmesi neticesinde yüzey mikro-sertliğinin azalması ve yumuşaması ile karakterizedir; bu safhada henüz belirgin bir yüzey altı defekti izlenmez (Levrini ve ark., 2014; Meurman & ten Cate, 1996). Asit maruziyetinin süreklilik kazanmasıyla birlikte yüzeysel mine tabakasının çözünmesi ilerler ve en nihayetinde bu koruyucu tabaka tamamen ortadan kalkar (Barbour & Rees, 2006; Eisenburger, 2009). Asidik atağın zaman içinde kronikleşmesi durumunda, yalnızca oklüzal yüzeyler değil, dişin birden fazla aksiyel yüzeyi de değişen derecelerde etki altına girer (Kaidonis, 2008).

Dental erozyonlar etiyopatogenetik kaynaklarına göre dış kaynaklı (ekstrinsik) ve iç kaynaklı (intrinsik) olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir:

5.1. Dış Kaynaklı (Ekstrinsik) Erozyon

Ekstrinsik erozyon lezyonları; başta karbonatlı/gazlı içecekler olmak üzere ortofosforik, sitrik ve karbonik asit içeren besin ile içeceklerin yoğun tüketimiyle doğrudan ilişkilidir. Bunlara ek olarak malik, tartarik ve diğer organik asit türleri de doku yıkım mekanizmasında etkin rol oynamaktadır. Şeker içerikli meyve suları, bünyelerinde barındırdıkları koruyucu katkı maddeleri ile hem organik hem de inorganik asit profilleri nedeniyle dental dokular üzerinde yüksek eroziv potansiyele sahiptir (O'Toole & Bartlett, 2017).

Benzer şekilde eroziv risk taşıyan sporcu içecekleri; barındırdıkları karbonhidrat, elektrolit ve sıvı kombinasyonları sayesinde rehidrasyon ve enerji desteği sağlamak amacıyla özellikle fiziksel aktiviteler esnasında ya da sonrasında sıklıkla tüketilmektedir. Ancak yoğun egzersiz sırasında tükürük debisinin ve koruyucu tamponlama kapasitesinin düşmesi, mine yüzeyindeki koruyucu pelikül tabakasının yetersiz kalmasına ve asidik sporcu içeceklerinin yarattığı eroziv etkinin şiddetlenmesine zemin hazırlamaktadır (Sirimaharaj ve ark., 2002).

pH değeri 5,5 eşiğinin altında kalan asidik ağız bakım ürünlerinin ve gargaraların uzun süreli kullanımı da erozyon riskini artıran etkenler arasındadır. Ayrıca tükürük akış hızını baskılayarak hiposalivasyona yol açan ve tükürüğün tamponlama kapasitesini düşüren bazı farmasötik ajanlar (örneğin antidepresanlar) ile asidik nitelikteki tükürük stimülanlarının kullanımı erozyon gelişimini tetikleyebilmektedir. İlaveten, bulantı ve emezis (kusma) yan etkilerine yol açan medikasyonlar da intrinsik asit maruziyetini ikincil olarak artırarak dental sert dokularda kayıplara neden olabilmektedir. Yüksek klor konsantrasyonuna sahip havuz suları hidroklorik asit oluşumuna yol açarak yüzücülerde mine erozyonunu indükleyebilmektedir.

Bunun yanı sıra, asidik buhar ve kimyasal ajanlara maruz kalınan endüstriyel iş ortamlarında (örneğin akü ve pil imalatı yapılan sanayi tesisleri) çalışan bireylerde artmış dental erozyon prevalansı bildirilmiştir (Centerwall ve ark., 1986; Lussi ve ark., 1991; Meurman & ten Cate, 1996; Millward ve ark., 1994; Warreth ve ark., 2020).

5.2. İç Kaynaklı (İntrinsik) Erozyon

İntrinsik erozyon tablosunda; gastroözofageal reflü hastalığı (GÖRH/GERD), psikojenik yeme bozuklukları (anoreksiya nervoza, bulimia nervoza ve ruminasyon) ile kronik alkol kullanımı veya bağımlılığı bulunan olgular yer almaktadır (Sugita ve ark., 2017). Gebelik fizyolojisi tek başına bir erozyon etkeni olmamakla birlikte, gestasyonel dönemdeki hormonal dalgalanmalara bağlı olarak gelişen beslenme değişiklikleri ve tekrarlayan emezis epizotları nedeniyle dental erozyon gelişme riski yükselmektedir (Fairburn ve ark., 1992). Gastroözofageal reflü hastalığının en yaygın semptomu retrosternal yanmadır (pyrosis). Hastalık; intraabdominal basınç artışı, alt özofagus sfinkterinin yetersizliği ve mide asit sekresyonundaki artış gibi mekanizmalarla mide içeriğinin özofagusa ve ileri evrelerde oral kaviteye kadar regürjitasyonuna yol açmaktadır (Scheutzel, 1996). Mide kaynaklı gastrik asitlerin (hidroklorik asit) oral alana ulaşarak diş yüzeylerinde belirgin erozyon lezyonları oluşturduğu bilimsel olarak kesinleşmiştir (Bartlett ve ark., 1996; Smith & Knight, 1984).

Yeme bozuklukları, ciddi fiziksel ve psikososyal disfonksiyonlarla seyreden multifaktöriyel psikiyatrik tablo gruplarıdır. Bu grupta yer alan anoreksiya nervoza, bireyin kalori alımını patolojik düzeyde kısıtlaması sonucu gelişen şiddetli kütle kaybı ile belirlenir. Bulimia nervoza ise yineleyen tıknırcasına yeme ataklarını takip eden telafi edici kasıtlı kusma (purging) davranışları ile karakterizedir. Anorektik hastalarda vücut kitle

indeksi genellikle fizyolojik sınırların çok altındayken, bulimik hastaların kilo değerleri çoğunlukla normosınırdadır seyretmektedir (McLoughlin & Hassanyeh, 1990). Bulimia tedavisinde reçete edilen psikoaktif ajanların kserostomik (tükürük salgısını azaltıcı) yan etkileri, ağız ortamındaki fizyolojik tamponlama mekanizmalarını zayıflatarak erozyon riskini dolaylı olarak daha da yükseltmektedir (Fairburn ve ark., 1992; Järvinen ve ark., 1991; McLoughlin & Hassanyeh, 1990).

Erken evre erozyon lezyonları; yüzeysel mikro-strüktürün kaybına bağlı olarak cilalı, pürüzsüz ve matlığını kaybetmiş bir mine yüzeyi ile karakterizedir. Başlangıç lezyonları çoğunlukla koronal bölgelerde konumlanırken, servikal gingival sınırdaki mine bandı anatomik ve fiziksel koruma mekanizmaları sayesinde sıklıkla intakt (sağlam) kalır (López-Frías ve ark., 2012). Hastalar genellikle sert doku kaybına ikincil olarak gelişen dentin hipersensitivitesi şikayeti ile kliniğe başvururlar; abrazyondan farklı olarak erozyon vakalarında belirgin bir dentin hassasiyeti tablosu hâkimdir.

Oklüzal anatomide tüberkül konveksitelerinde düzleşmeler veya içbükey (konkav) çöküntüler gözlenebilir. Amalgam gibi mevcut restoratif materyallerin marjinal kenarları, çevredeki diş dokusunun çözünmesine bağlı olarak yüzeyden yükselmiş (amalgam island / amalgam adacığı) bir görünüm sergiler. Kusma epizotlarına bağlı gelişen intrinsik lezyonlar tipik olarak anterior dişlerin palatinal ve lingual yüzeylerinde yoğunlaşır (Boric ve ark., 2004). İleri evre erozyon olgularında ise oklüzal yüzeylerde yaygın doku kayıpları, tüberkül eğimlerinin silinmesi ve sıg, çanak/tabak formunda (saucer-shaped) geniş lezyon morfolojileri izlenmektedir (Khan ve ark., 1998).

6. ÖNLEYİCİ STRATEJİLER

Diş aşınmalarının önlenmesi ile diş çürüklerinin önlenmesi aynı stratejik yaklaşımı kapsamaz. Diş aşınmaları, çok faktörlü yapısı nedeniyle korunması ve yönetilmesi daha güç bir problem teşkil etmektedir. Günümüzde diş aşınmalarının giderek artan bir klinik sorun olduğu kabul edilmekle birlikte, hangi bireylerin bu süreçten etkileneceğini önceden tahmin etmek oldukça zordur; bu durum tam anlamıyla önleyici bir yaklaşım geliştirmeyi zorlaştırmaktadır.

Diş aşınmalarını önleme stratejileri büyük ölçüde bireysel faktörlere bağlıdır. Abrazyon ve atrizyon doğrudan kişiye özgü etkenlerle şekillenirken; erozyon, toplumdaki yaygınlığı ve diyetle olan doğrudan ilişkisi bakımından çürük hastalığına benzer özellikler gösterir. Buna karşın, diş çürüğünün önlenmesinde yüksek başarı sağlayan tedavi stratejilerinin erozyon üzerinde oldukça sınırlı bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Diş erozyonu prevalansındaki artış, bu alandaki araştırmaların yoğunlaşmasına yol açmış; bu durum diğer diş aşınma tiplerinin daha az odak noktası olmasına neden olmuştur(Holbrook ve ark., 2003).

Çeşitli *in vitro* çalışmalar, potansiyel olarak aşındırıcı içeceklere florür ilave edilmesinin, bu içeceklerin eroziv potansiyelini düşürebileceğini göstermektedir(Grenby, 1996; Mistry & Grenby, 1993). Asitli veya aşındırıcı bir içecek tüketiminin ardından peynir ya da süt ürünlerinin tercih edilmesi, minenin re-mineralizasyonuna ve yeniden sertleşmesine katkı sağlar (Gedalia ve ark., 1991, 1992). Ayrıca, aşındırıcı içeceklerin tüketim şeklinin de erozyon şiddetini doğrudan etkilediği düşünülmektedir. Özellikle kola benzeri gazlı içeceklerin yutulmadan önce ağız içinde çalkalanması erozyon riskini artırmaktadır(Johansson ve ark., 2002). Buna karşılık pipet kullanımı, erozyondan en sık etkilenen maksiller kesici dişlerin

palatinal yüzeylerinin asitli içeceklerle temasını sınırlayarak eroziv potansiyeli azaltmaktadır (Edwards ve ark., 1998). Attin ve ark., dişlerin aside maruz kalmasının ardından fırçalama işlemi için en az 60 dakika beklenmesi gerektiğini bildirmiştir (Holbrook ve ark., 2003).

Abrazyon lezyonlarının gelişimini engellemek adına diş fırçalama tekniğinin düzeltilmesi, düşük abrazyon değerine sahip diş macunlarının seçilmesi ve mekanik aşınmaya yol açabilecek parafonksiyonel alışkanlıkların kontrol altına alınması gerekmektedir. Öte yandan diş aşınmaları, altta yatan gastroözofageal reflü veya bulimik bozuklukların bir ilk belirtisi olarak da ortaya çıkabilir. Bu nedenle bu tür olguların yönetiminde tıp ve diş hekimliği disiplinleri arasındaki interdisiplinler iş birliği kritik önem taşımaktadır (Holbrook ve ark., 2003).

7. RESTORATİF TEDAVİ

Çürüksüz servikal lezyonların restoratif tedavisinde amalgam ve altın gibi metalik restoratif materyallerin kullanımının güncel yaklaşımlarda yer almadığı açıkça görülmektedir (Perez ve ark., 2012). Günümüzde servikal lezyonların restorasyonunda sıklıkla tercih edilen materyaller şunlardır:

- Cam iyonomer simanlar
- Rezin modifiye cam iyonomer simanlar
- Poliasit modifiye kompozit rezinler (kompomerler)
- Kompozit rezinler (Lyttle ve ark., 1998)

Servikal bölgede gözlenen çürüksüz lezyonların tedavisinde bazı araştırmacılar; mikro dolduruculu kompozit rezinlerin veya düşük elastikiyet modülüne sahip akıcı (flowable)

kompozitlerin kullanılmasını önermektedir. Bu sayede restoratif materyal, oklüzal yükler altında diş dokusu ile birlikte esneyerek restorasyonun retansiyon kaybını ve başarısızlığını önlemektedir (Attar ve ark., 2003; Perez ve ark., 2012). Aşınmanın ileri düzeyde olduğu ve doku kaybının geniş saha kapladığı vakalarda ise laminate veneer uygulamaları veya tam kron/köprü restorasyonları gibi protetik tedavi seçenekleri değerlendirilmelidir (Lambrechts ve ark., 1996).

8. SONUÇ

Çürüksüz servikal lezyonlar (ÇSL); atrizyon, abrazyon, abfraksiyon ve erozyonun tek başına veya sinerjik etkileşimiyle gelişen multifaktöriyel patolojilerdir. Bu lezyonların klinik yönetimi, yalnızca doku kaybının restorasyonu ile sınırlı kalmayıp altta yatan etiyolojik faktörlerin doğru tespiti ve eliminasyonunu kapsayan bütüncül bir yaklaşım gerektirir.

Biyomekanik ve kimyasal dinamikler doğrultusunda başarılı tedavinin ilk adımı, kişiye özgü koruyucu stratejilerdir. Beslenme düzenlemesi, oral hijyen eğitimi, düşük abrazyonlu ürün tercihi ve parafonksiyonel aktivitelerin kontrolü lezyon progresyonunu durdurmada kritiktir. İntrinsik erozyon olgularında ise sistemik ve psikojenik faktörlerin kontrolü adına tıp disiplinleriyle iş birliği esastır.

Restoratif aşamada materyal seçimi, servikal bölgenin biyomekaniğine uygun olmalıdır. Düşük elastisite modüllü adeziv sistemler, akıcı kompozitler ve flor salan rezin modifiye cam iyonomer simanlar; oklüzal stresler altında diş dokusuyla uyumlu esneme göstererek marjinal bütünlüğü korur. İleri doku kayıplarında ise protetik yaklaşımlar fonksiyonel ve estetik bir alternatif sunar.

Özetle, ÇSL yönetiminde doğru etiyolojik teşhis, etkin koruyucu hekimlik ve biyomekanik uyumlu güncel biyomateryal seçimi; uzun dönemli klinik başarının, retansiyonun ve hasta memnuniyetinin temel belirleyicileridir.

KAYNAKÇA

- Attar, N., Tam, L. E., & McComb, D. (2003). Flow, strength, stiffness and radiopacity of flowable resin composites. *Journal (Canadian Dental Association)*, 69(8), 516–521. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12954140>
- Barbour, M. E., & Rees, G. D. (2006). The role of erosion, abrasion and attrition in tooth wear. *The Journal of Clinical Dentistry*, 17(4), 88–93. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17131710>
- Bartlett, D. W., Evans, D. F., Anggiansah, A., & Smith, B. G. (1996). A study of the association between gastro-oesophageal reflux and palatal dental erosion. *British Dental Journal*, 181(4), 125–131. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4809187>
- Bell, E. J., Kaidonis, J., Townsend, G., & Richards, L. (1998). Comparison of exposed dentinal surfaces resulting from abrasion and erosion. *Australian Dental Journal*, 43(5), 362–366. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.1998.tb00190.x>
- Borcic, J., Anic, I., Urek, M. M., & Ferreri, S. (2004). The prevalence of non-carious cervical lesions in permanent dentition. *Journal of Oral Rehabilitation*, 31(2), 117–123. <https://doi.org/10.1046/j.0305-182x.2003.01223.x>
- Boushell, L. W., Shugars, D. A., & Eidson, R. S. (2019). Patient assessment, examination, diagnosis, and treatment planning. In *Sturdevant's Art and Science of Operative Dentistry* (pp. 95–119). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-47833-5.00003-4>
- Bulut, A. C., & Türkoğlu, Ö. (2018a). Diş aşınmalarının etiyojisi, prevalansı ve patogenezi. *Turkish Journal of*

- Clinics and Laboratory*, 9(2), 137–143.
<https://doi.org/10.18663/tjcl.322529>
- Bulut, A. C., & Türkoğlu, Ö. (2018b). Diş aşınmalarının etiyolojisi, prevalansı ve patogenezi. *Turkish Journal of Clinics and Laboratory*, 9(2), 137–143.
<https://doi.org/10.18663/tjcl.322529>
- Centerwall, B. S., Armstrong, C. W., Funkhouser, L. S., & Elzay, R. P. (1986). Erosion of dental enamel among competitive swimmers at a gas-chlorinated swimming pool. *American Journal of Epidemiology*, 123(4), 641–647.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114283>
- Ceruti, P., Menicucci, G., Mariani, G. D., Pittoni, D., & Gassino, G. (2006). Non carious cervical lesions. A review. *Minerva Stomatologica*, 55(1-2), 43–57.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16495872>
- Davies, S. J., Gray, R. J. M., & Qualtrough, A. J. E. (2002). Management of tooth surface loss. *British Dental Journal*, 192(1), 11–16, 19–23.
<https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4801278>
- Eccles, J. D., & Jenkins, W. G. (1974). Dental erosion and diet. *Journal of Dentistry*, 2(4), 153–159.
[https://doi.org/10.1016/0300-5712\(74\)90044-x](https://doi.org/10.1016/0300-5712(74)90044-x)
- Edwards, M., Ashwood, R. A., Littlewood, S. J., Brocklebank, L. M., & Fung, D. E. (1998). A videofluoroscopic comparison of straw and cup drinking: the potential influence on dental erosion. *British Dental Journal*, 185(5), 244–249. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4809782>
- Eisenburger, M. (2009). Degree of mineral loss in softened human enamel after acid erosion measured by chemical analysis. *Journal of Dentistry*, 37(6), 491–494.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2009.02.001>

- El Aidi, H., Bronkhorst, E. M., Huysmans, M. C. D. N. J. M., & Truin, G. J. (2011). Multifactorial analysis of factors associated with the incidence and progression of erosive tooth wear. *Caries Research*, 45(3), 303–312. <https://doi.org/10.1159/000328671>
- Fairburn, C. G., Stein, A., & Jones, R. (1992). Eating habits and eating disorders during pregnancy. *Psychosomatic Medicine*, 54(6), 665–672. <https://doi.org/10.1097/00006842-199211000-00006>
- Gallien, G. S., Kaplan, I., & Owens, B. M. (1994). A review of noncarious dental cervical lesions. *Compendium (Newtown, Pa.)*, 15(11), 1366, 1368–1372, 1374; quiz 1374. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7758024>
- Gedalia, I., Dakuar, A., Shapira, L., Lewinstein, I., Goultschin, J., & Rahamim, E. (1991). Enamel softening with Coca-Cola and rehardening with milk or saliva. *American Journal of Dentistry*, 4(3), 120–122. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1863431>
- Gedalia, I., Davidov, I., Lewinstein, I., & Shapira, L. (1992). Effect of hard cheese exposure, with and without fluoride prerinse, on the rehardening of softened human enamel. *Caries Research*, 26(4), 290–292. <https://doi.org/10.1159/000261454>
- Grenby, T. H. (1996). Lessening dental erosive potential by product modification. *European Journal of Oral Sciences*, 104(2 (Pt 2)), 221–228. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1996.tb00071.x>
- Grippio, J. O. (1991). Abfractions: a new classification of hard tissue lesions of teeth. *Journal of Esthetic Dentistry*, 3(1), 14–19. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.1991.tb00799.x>

- Grippio, J. O., Simring, M., & Coleman, T. A. (2012). Abfraction, abrasion, biocorrosion, and the enigma of noncarious cervical lesions: a 20-year perspective. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry : Official Publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [ve ark.]*, 24(1), 10–23. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2011.00487.x>
- Holbrook, W. P., Arnadóttir, I. B., & Kay, E. J. (2003). Prevention. Part 3: prevention of tooth wear. *British Dental Journal*, 195(2), 75–81. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4810331>
- Imfeld, T. (1996). Dental erosion. Definition, classification and links. *European Journal of Oral Sciences*, 104(2 (Pt 2)), 151–155. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1996.tb00063.x>
- Ingelbrecht, K., Singh, Y., Durgadmath, N., Moieni, R., & Lee, N. (2024). Cultural diversity and urban features: An Australian case study. *Open Journal of Social Sciences*, 12(07), 470–486. <https://doi.org/10.4236/jss.2024.127034>
- Järvinen, V. K., Rytömaa, I. I., & Heinonen, O. P. (1991). Risk factors in dental erosion. *Journal of Dental Research*, 70(6), 942–947. <https://doi.org/10.1177/00220345910700060601>
- Johansson, A.-K., Lingström, P., & Birkhed, D. (2002). Comparison of factors potentially related to the occurrence of dental erosion in high- and low-erosion groups. *European Journal of Oral Sciences*, 110(3), 204–211. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0447.2002.11211.x>
- Kaidonis, J. A. (2008). Tooth wear: the view of the anthropologist. *Clinical Oral Investigations*, 12 Suppl

1(Suppl 1), S21–S26. <https://doi.org/10.1007/s00784-007-0154-8>

Khan, F., Young, W. G., & Daley, T. J. (1998). Dental erosion and bruxism. A tooth wear analysis from south east Queensland. *Australian Dental Journal*, 43(2), 117–127. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.1998.tb06100.x>

Lambrechts, P., Van Meerbeek, B., Perdigão, J., Gladys, S., Braem, M., & Vanherle, G. (1996). Restorative therapy for erosive lesions. *European Journal of Oral Sciences*, 104(2 (Pt 2)), 229–240. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1996.tb00072.x>

Lee, H. E., Lin, C. L., Wang, C. H., Cheng, C. H., & Chang, C. H. (2002). Stresses at the cervical lesion of maxillary premolar--a finite element investigation. *Journal of Dentistry*, 30(7-8), 283–290. [https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(02\)00020-9](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(02)00020-9)

Leinfelder, K. F. (1994). Restoration of abfracted lesions. *Compendium (Newtown, Pa.)*, 15(11), 1396, 1398–1400; quiz 1400. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7758027>

Levitch, L. C., Bader, J. D., Shugars, D. A., & Heymann, H. O. (1994). Non-carious cervical lesions. *Journal of Dentistry*, 22(4), 195–207. [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(94\)90107-4](https://doi.org/10.1016/0300-5712(94)90107-4)

Levrini, L., Di Benedetto, G., & Raspanti, M. (2014). Dental wear: a scanning electron microscope study. *BioMed Research International*, 2014, 340425. <https://doi.org/10.1155/2014/340425>

Litonjua, L. A., Andreana, S., Bush, P. J., & Cohen, R. E. (2003). Tooth wear: attrition, erosion, and abrasion. *Quintessence*

- International (Berlin, Germany : 1985)*, 34(6), 435–446.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12859088>
- López-Frías, F. J., Castellanos-Cosano, L., Martín-González, J., Llamas-Carreras, J. M., & Segura-Egea, J. J. (2012). Clinical measurement of tooth wear: Tooth wear indices. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 4(1), e48–e53. <https://doi.org/10.4317/jced.50592>
- Lussi, A., Schaffner, M., Hotz, P., & Suter, P. (1991). Dental erosion in a population of Swiss adults. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 19(5), 286–290. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.1991.tb00169.x>
- Lyttle, H. A., Sidhu, N., & Smyth, B. (1998). A study of the classification and treatment of noncarious cervical lesions by general practitioners. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 79(3), 342–346. [https://doi.org/10.1016/s0022-3913\(98\)70248-3](https://doi.org/10.1016/s0022-3913(98)70248-3)
- McLoughlin, I. J., & Hassanyeh, F. (1990). Pica in a patient with anorexia nervosa. *The British Journal of Psychiatry : The Journal of Mental Science*, 156, 568–570. <https://doi.org/10.1192/bjp.156.4.568>
- Meurman, J. H., & ten Cate, J. M. (1996). Pathogenesis and modifying factors of dental erosion. *European Journal of Oral Sciences*, 104(2 (Pt 2)), 199–206. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1996.tb00068.x>
- Millward, A., Shaw, L., Smith, A. J., Rippin, J. W., & Harrington, E. (1994). The distribution and severity of tooth wear and the relationship between erosion and dietary constituents in a group of children. *International Journal of Paediatric Dentistry*, 4(3), 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-263x.1994.tb00124.x>

- Mistry, M., & Grenby, T. H. (1993). Erosion by soft drinks of rat molar teeth assessed by digital image analysis. *Caries Research*, 27(1), 21–25. <https://doi.org/10.1159/000261510>
- Murray, C. G., & Sanson, G. D. (1998). Thegosis--a critical review. *Australian Dental Journal*, 43(3), 192–198. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.1998.tb00164.x>
- O'Toole, S., & Bartlett, D. (2017). The relationship between dentine hypersensitivity, dietary acid intake and erosive tooth wear. *Journal of Dentistry*, 67, 84–87. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.10.002>
- Patano, A., Malcangi, G., De Santis, M., Morolla, R., Settanni, V., Piras, F., Inchingolo, A. D., Mancini, A., Inchingolo, F., Dipalma, G., & Inchingolo, A. M. (2023). Conservative Treatment of Dental Non-Carious Cervical Lesions: A Scoping Review. *Biomedicines*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/biomedicines11061530>
- Perez, C. D. R., Gonzalez, M. R., Prado, N. A. S., de Miranda, M. S. F., Macêdo, M. de A., & Fernandes, B. M. P. (2012). Restoration of noncarious cervical lesions: when, why, and how. *International Journal of Dentistry*, 2012, 687058. <https://doi.org/10.1155/2012/687058>
- Rees, J. S., Hammadeh, M., & Jagger, D. C. (2003). Abfraction lesion formation in maxillary incisors, canines and premolars: a finite element study. *European Journal of Oral Sciences*, 111(2), 149–154. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0722.2003.00018.x>
- Richards, L. C., & Miller, S. L. (1991). Relationships between age and dental attrition in Australian aboriginals. *American Journal of Physical Anthropology*, 84(2), 159–164. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330840205>

- Sarode, G. S., & Sarode, S. C. (2013). Abfraction: A review. *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology : JOMFP*, 17(2), 222–227. <https://doi.org/10.4103/0973-029X.119788>
- Scheutzel, P. (1996). Etiology of dental erosion--intrinsic factors. *European Journal of Oral Sciences*, 104(2 (Pt 2)), 178–190. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1996.tb00066.x>
- Silva, A. G., Martins, C. C., Zina, L. G., Moreira, A. N., Paiva, S. M., Pordeus, I. A., & Magalhães, C. S. (2013). The association between occlusal factors and noncarious cervical lesions: a systematic review. *Journal of Dentistry*, 41(1), 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.10.018>
- Sirimaharaj, V., Brearley Messer, L., & Morgan, M. V. (2002). Acidic diet and dental erosion among athletes. *Australian Dental Journal*, 47(3), 228–236. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2002.tb00334.x>
- Smith, B. G., & Knight, J. K. (1984). A comparison of patterns of tooth wear with aetiological factors. *British Dental Journal*, 157(1), 16–19. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4805401>
- Sugita, I., Nakashima, S., Ikeda, A., Burrow, M. F., Nikaido, T., Kubo, S., Tagami, J., & Sumi, Y. (2017). A pilot study to assess the morphology and progression of non-carious cervical lesions. *Journal of Dentistry*, 57, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.12.004>
- Terry, D. A., McGuire, M. K., McLaren, E., Fulton, R., & Swift, E. J., Jr. (2003). Perioesthetic approach to the diagnosis and treatment of carious and noncarious cervical lesions: Part I. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry : Official Publication of the American Academy of Esthetic*

Dentistry ... [ve ark.], 15(4), 217–232.
<https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2003.tb00290.x>

Warreth, A., Abuhijleh, E., Almaghribi, M. A., Mahwal, G., & Ashawish, A. (2020). Tooth surface loss: A review of literature. *The Saudi Dental Journal*, 32(2), 53–60.
<https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2019.09.004>

KENDİNDEN ADEZİV AKIŞKAN REZİN KOMPOZİTLER: YAPI, ADEZYON VE KLİNİK KULLANIM

Kerim Safa KUL¹

1. GİRİŞ

Rezin kompozitler, direkt restoratif tedavilerde yaygın olarak kullanılan materyallerdir. Konvansiyonel rezin kompozitlerin mine ve dentine bağlanmasında genellikle ayrı bir adeziv sistem uygulanır. Adeziv uygulamanın birden fazla klinik basamak içermesi, işlem süresini ve tekniğe duyarlılığı artırabilir (Delgado, Alves, Pires, Nunes Ferreira, & Cuevas-Suárez, 2026). Bu gereksinim, uygulama basamaklarını azaltan restoratif materyallerin geliştirilmesine yol açmıştır (Delgado et al., 2026).

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitler, ayrı adeziv uygulama basamağını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir (Delgado et al., 2026). İçerdikleri asidik fonksiyonel monomerler sayesinde, ayrı bir adeziv sistem kullanılmadan mine ve dentine bağlanmaları hedeflenir (Delgado et al., 2026; Poitevin et al., 2013).

¹ Arş. Gör., Uşak Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0003-2120-6991.

2. KENDİNDEN ADEZİV AKIŞKAN REZİN KOMPOZİTLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Tanımı ve Gelişimi

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitler, ayrı bir adeziv sistem uygulanmadan diş dokularına doğrudan bağlanmak üzere geliştirilen rezin esaslı restoratif materyallerdir. Literatürde bu materyaller için self-adhesive flowable resin composites ve self-adhering flowable composites terimleri kullanılmaktadır. Temel amaç, akışkan rezin kompozitlerin restoratif özellikleri ile adeziv işlevi tek materyalde birleştirmektir (Delgado et al., 2026; Poitevin et al., 2013).

Kendinden adeziv akışkan kompozitler 2009 yılında ticari kullanıma sunulmuştur. İlk ticari ürün Fusio Liquid Dentin olmuş, bunu 2010 yılında Vertise Flow izlemiştir (Delgado et al., 2026). İlk ürünlerin ardından farklı rezin matrisleri, fonksiyonel monomerler ve doldurucu sistemleri içeren yeni materyaller geliştirilmiştir.

Delgado et al. (2026), güncel pazarda 11 ticari kendinden adeziv akışkan rezin kompozit bulunduğunu bildirmiştir. Aynı derlemede, bu ürünlerin yalnızca bir bölümü için kapsamlı laboratuvar ve klinik veri bulunduğu belirtilmiştir.

2.2. Bileşim ve Fonksiyonel Monomerler

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitler; organik rezin matriks, inorganik doldurucular, fonksiyonel monomerler ve fotobaşlatıcı sistemlerden oluşur. Akışkan kıvamın sağlanabilmesi için doldurucu miktarı genellikle yüksek viskoziteli kompozitlerden daha düşüktür. Güncel ticari ürünlerde hidrofilik monomer içeriğinin ağırlıkça yaklaşık %5–10 arasında olduğu, inorganik doldurucu içeriğinin ise hacimce %55 veya daha düşük olduğu bildirilmiştir (Delgado et al., 2026).

Bu materyalleri konvansiyonel akışkan kompozitlerden ayıran temel özellik, asidik fonksiyonel monomer içermeleridir. Bu monomerler polimerizasyon sırasında rezin matrikse katılırken, asidik grupları diş dokusunun mineral yapısıyla etkileşime girer. Kullanılan monomer tipi ürüne göre değişir. Fusio Liquid Dentin’de 4-META, Vertise Flow’da GPDM, Constic’te ise 10-MDP esaslı fonksiyonel monomerler kullanılmaktadır (Al-Saud, Aodah, & Abu Asab, 2022; Delgado et al., 2026).

Rezin matriksin diğer bileşenleri de ürünler arasında farklıdır. Vertise Flow’da HEMA ve Bis-GMA bulunurken, Constic’in yapısında Bis-GMA, UDMA, HEMA ve TEGDMA yer almaktadır (Al-Saud et al., 2022). Rezin matriksin yapısı polimerizasyonu, suyla etkileşimi ve artık monomer salınımını etkileyebilir. Al-Saud et al. (2022), monomer salınımının materyalin genel sınıfından çok, kullanılan monomerlerin kimyasal özellikleri ve matriks yapısıyla ilişkili olduğunu bildirmiştir. Yao et al. (2024) da farklı kendinden adeziv kompozitlerin dönüşüm derecesi, su sorpsiyonu, çözünürlük ve bağlanma davranışı açısından birbirinden ayrıldığını göstermiştir.

Alves, Alves, Silva ve Delgado (2026), deneysel formülasyonlarda 10-MDP kullanımının bağlanma ve çözünürlük açısından avantaj sağlayabildiğini, HEMA içeren formülasyonlarda ise daha yüksek dönüşüm dereceleri elde edildiğini bildirmiştir.

S-PRG (surface pre-reacted glass ionomer; yüzey ön reaksiyonlu cam iyonomer) doldurucu içeren sistemlerde iyon salınımının yanı sıra antibakteriyel ve adeziv özellikler araştırılmaktadır. Çetin et al. (2026), S-PRG içeren kendinden adeziv bir kompozitin çoklu iyon salınımı ile birlikte mekanik, adeziv ve antibakteriyel özellikler gösterebildiğini bildirmiştir.

Literatürde sık değerlendirilen bazı ticari materyaller ve öne çıkan özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerin bazı ticari örnekleri ve literatürde değerlendirilen başlıca özellikleri

Ticari materyal	Fonksiyonel monomer / sistem	Literatürde değerlendirilen başlıca özellikler
Fusio Liquid Dentin	4-META	Bağlanma, mikrosızıntı, klinik retansiyon
Vertise Flow	GPDM	Adezyon, mekanik özellikler, klinik performans
Constic	10-MDP	Bağlanma, yüzey özellikleri, klinik performans
FIT SA	Fosforik asit esteri / S-PRG doldurucu sistemi	İyon salınımı, antibakteriyel etki

Not: Al-Saud et al. (2022), Çetin et al. (2026), Delgado et al. (2026), Yao et al. (2024) ve Yeloğlu-Akbuar, Sarılioğlu Güngör, Öztürk ve Dalkılıç (2026) temel alınarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

3. ADEZYON VE BAĞLANMA ÖZELLİKLERİ

3.1. Diş Dokularıyla Adezyon

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerde bağlanma, materyalin içerdiği asidik fonksiyonel monomerlerin diş yüzeyiyle doğrudan etkileşimine dayanır. Ayrı bir asitleme veya primer uygulaması yapılmadığı için yüzeyin hazırlanması ve monomerlerin mine ya da dentine ulaşabilmesi büyük önem taşır. Bu materyallerin diş dokularında oluşturduğu demineralizasyon ve mikromekanik etkileşim, konvansiyonel adeziv sistemlere göre daha sınırlıdır (Poitevin et al., 2013).

Dentin yüzeyinde smear tabakası bu etkileşimi belirleyen başlıca faktörlerden biridir. Kavite preparasyonu sırasında oluşan smear tabakası dentin yüzeyini örter ve tübül girişlerini kısmen kapatır. Kendinden adeziv akışkan kompozitlerin asiditesi bu tabakayı tamamen uzaklaştırmak için yeterli olmayabilir. Bu

durum fonksiyonel monomerlerin alttaki dentinle temasını sınırlar (Poitevin et al., 2013).

Mine et al. (2017), Vertise Flow ile diş dokuları arasındaki arayüzü transmisyon elektron mikroskobu ile incelemiştir. Smear tabakasıyla kaplı dentinde belirgin bir yüzey demineralizasyonu görülmemiş, smear tabakasının bulunmadığı dentinde ise yaklaşık 100–200 nm kalınlığında ince bir etkileşim alanı saptanmıştır. Aprizmatik mine yüzeyinde de materyal ile diş dokusu arasındaki etkileşim sınırlı bulunmuştur.

Bağlanma yalnızca yüzeyin demineralizasyonuna bağlı değildir. Fonksiyonel monomerlerin hidroksiapatitteki kalsiyumla kimyasal etkileşimi de bağlantıya katkıda bulunabilir. Bu etkileşim kullanılan monomerin yapısına göre değişir. Materyalin yüzeyi ıslatabilmesi, yüzey düzensizliklerine penetre olabilmesi ve uygulama sırasında yüzeye yeterli temas sağlaması da arayüz oluşumunda rol oynar (Delgado et al., 2026).

3.2. Mine ve Dentine Bağlanma

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerin mine ve dentine bağlanma dayanımı, ayrı bir adeziv sistemle kullanılan konvansiyonel akışkan kompozitlere göre genellikle daha düşüktür (Poitevin et al., 2013). Bu eğilim, hem mine hem de dentinde ve yaşlandırılmış örneklerde sistematik derleme ve meta-analiz bulgularıyla da desteklenmiştir (David et al., 2022).

Bağlanma performansı ürün ve yaşlandırma koşullarına göre değişebilir. Yao et al. (2024), bazı kendinden adeziv rezin kompozitlerde 6 aylık yaşlandırma sonrasında dentin bağ dayanımının azaldığını bildirmiştir. Fonksiyonel monomer varlığı bu nedenle uzun dönem bağlanma stabilitesi için tek başına yeterli görünmemektedir (Yao et al., 2024).

3.3. Yüzey Ön İşlemleri

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerin bağlanma performansı yüzey ön işlemlerinden etkilenebilir. Mine yüzeyinin fosforik asitle pürüzlendirilmesi daha belirgin mikromekanik retansiyon sağlayabilir; Hayashi et al. (2024), üç materyalde mine bağ dayanımının asitleme sonrasında arttığını ve mikrosızıntının azaldığını bildirmiştir.

Dentinde fosforik asidin etkisi daha değişkendir. Sibai, El Mourad, Al Suhaibani, Al Ahmadi ve Al Dosary (2022), asitleme sonrasında bağ dayanımının arttığını bildirmiştir. Aynı çalışmada, dentinde daha yüksek değerler konvansiyonel akışkan kompozitin etch-and-rinse adeziv ile kullanıldığı grupta elde edilmiştir. Kendinden adeziv kompozitin altında ayrı bir adeziv kullanılması da dentin bağlanmasını ve marjinal sızdırmazlığı iyileştirebilir (Bektas, Eren, Akin, & Akin, 2013).

4. FİZİKSEL, MEKANİK VE BİYOLOJİK ÖZELLİKLER

4.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri; rezin matriksin yapısı, doldurucu miktarı, doldurucu tipi ve polimerizasyon etkinliğinden etkilenir. Akışkan kıvamın korunması için doldurucu oranının sınırlı olması, bazı ürünlerde mekanik dayanımı azaltabilir (Delgado et al., 2026).

Dönüşüm derecesi, rezin esaslı materyallerin polimerizasyon sonrası özelliklerini belirleyen temel parametrelerden biridir. Czasch ve Ilie (2013), Vertise Flow'un yüksek dönüşüm derecesi gösterdiğini ve incelenen akışkan kompozitler arasında en yüksek mikromekanik özelliklere sahip olduğunu bildirmiştir.

Polimerizasyon büzülmesi ve buna bağlı stres, restorasyon-diş arayüzünde boşluk oluşumuna neden olabilir. Sampaio et al. (2017), Vertise Flow'da yüksek hacimsel büzülme değerleri bildirmiştir. Nakano et al. (2020) ise Vertise Flow ve Fusio Liquid Dentin'in konvansiyonel ve bulk-fill akışkan kompozitlere göre daha yüksek polimerizasyon stresi ve daha fazla arayüz boşluğu oluşturduğunu göstermiştir.

Mekanik özellikler ürünler arasında belirgin farklılık gösterebilir. Brewster ve Roberts (2023), 23 akışkan rezin kompozitin 12 aylık mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. Konvansiyonel akışkan kompozitler genel olarak daha yüksek eğilme dayanımı ve elastik modül göstermiştir. Aynı çalışmada bazı kendinden adeziv materyaller ISO 4049'da belirtilen eğilme dayanımı sınırının altında kalmıştır. Yeloğlu-Akbuar et al. (2026) da incelenen materyaller arasında mikrosertlik farklılıkları saptamıştır. En yüksek mikrosertlik değerleri konvansiyonel akışkan kompozitte ölçülmüştür.

4.2. Su ile Etkileşim ve Yaşlanma

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerde hidrofilik monomerler diş dokularının ıslanmasına ve fonksiyonel monomerlerin iyonize olmasına katkı sağlarken su sorpsiyonu ve çözünürlüğü artırabilir (Delgado et al., 2026). Yao et al. (2024), ürünler arasında su sorpsiyonu ve çözünürlük açısından belirgin farklılıklar bildirmiştir. Fusio Liquid Dentin ve Constic daha düşük su sorpsiyonu gösterirken, Vertise Flow daha yüksek çözünürlük göstermiştir.

Uzun süreli su teması rezin matrikste plastizasyona ve mekanik özelliklerde değişime neden olabilir. Islam et al. (2026), bir yıllık yaşlandırma sonrasında bazı kendinden adeziv kompozitlerde daha yüksek su sorpsiyonu ve çözünürlük ile daha düşük sertlik ve elastik özellikler saptamıştır.

4.3. Yüzey Özellikleri ve Renk Stabilitesi

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerin yüzey özellikleri; rezin matriksin yapısı, doldurucu miktarı ve partikül özelliklerinden etkilenir. Diş fırçalama ve ağız ortamındaki mekanik etkiler zamanla yüzey pürüzlülüğü ve parlaklıkta değişime neden olabilir (Leal et al., 2024; Malavasi et al., 2015).

Malavasi et al. (2015), Vertise Flow ve Fusio Liquid Dentin'i nanodolduruculu bir kompozitle karşılaştırmıştır. Yirmi bin fırçalama döngüsü sonrasında tüm materyallerde yüzey pürüzlülüğü artmış, parlaklık azalmıştır. Leal et al. (2024) da Constic ve Yflow SA'nın simüle fırçalama sonrasındaki yüzey pürüzlülüğünün farklı olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada renk değişimi açısından gruplar arasında anlamlı fark saptanmamış ve ölçülen değişimler kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır.

Yeloğlu-Akbuar et al. (2026), Vertise Flow, Fusio Liquid Dentin, Constic ve Nova Compo SF'nin yüzey pürüzlülüğü ile kahve sonrası renk değişimini değerlendirmiştir. Fusio Liquid Dentin en yüksek yüzey pürüzlülüğünü gösterirken, Nova Compo SF uzun süreli renklendirme sonrasında daha düşük renk değişimi değerleri göstermiştir. Materyaller arasındaki bu farklılıkların rezin matriks ve doldurucu yapısıyla ilişkili olabileceği bildirilmiştir.

4.4. Biyolojik Özellikler ve Antibakteriyel Etki

Rezin esaslı restoratif materyallerde polimerizasyon sonrasında reaksiyona girmeden kalan bazı monomerler çevreye salınabilir. Bu durum özellikle pulpa dokusuna yakın uygulamalarda biyolojik uyumluluk açısından önem taşır. Al-Saud et al. (2022), farklı rezin esaslı materyallerden salınan artık monomerleri incelemiş ve monomer salınımının materyalin rezin matriksi ve içerdiği monomerlerin kimyasal özellikleriyle ilişkili

olduğunu bildirmiştir. Vertise Flow'dan HEMA salınımı diğer incelenen materyallerden daha yüksek bulunmuştur.

İn vitro sitotoksikite sonuçları ürünler arasında farklılık göstermektedir. Ohlsson et al. (2024), Vertise Flow, Fusio Liquid Dentin ve Constic dahil farklı kendinden adeziv restoratif materyalleri insan pulpa hücreleri üzerinde değerlendirmiştir. Vertise Flow ve Constic hücre canlılığında belirgin azalmaya neden olmuştur. Avcılar, Bakır, Bakır ve Irtegun Kandemir (2026) da Vertise Flow'un seyreltilmemiş ekstraktının L929 fibroblast hücrelerinde sitotoksik etki gösterdiğini bildirmiştir. Aynı çalışmada, sitotoksik etkinin konsantrasyon ve temas süresine göre değiştiği gösterilmiştir.

Bakteriyel tutunma da materyale göre değişmektedir. Yeloğlu-Akbuar et al. (2026), Vertise Flow, Fusio Liquid Dentin, Constic ve Nova Compo SF üzerinde *Streptococcus mutans* ve *Lactobacillus casei* adezyonunu değerlendirmiştir. Nova Compo SF ve konvansiyonel akışkan kompozitte daha düşük, Fusio Liquid Dentin'de ise daha yüksek bakteriyel adezyon saptanmıştır. Farklılıkların yalnızca yüzey pürüzlülüğü ile açıklanamayacağı belirtilmiştir.

S-PRG doldurucu içeren materyallerde antibakteriyel özellikler de araştırılmaktadır. Çetin et al. (2026), FIT SA'nın *S. mutans* gelişimini anlamlı düzeyde inhibe ettiğini bildirmiştir. Diğer kendinden adeziv kompozitlerde benzer bir etki görülmemiştir. Bu etkinin S-PRG doldurucudan salınan iyonlarla, özellikle borat iyonlarıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir.

5. KLİNİK UYGULAMA VE PERFORMANS

5.1. Uygulama Protokolü

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerde ayrı bir adeziv basamağının bulunmaması, uygulamanın yalnızca

materyalin kaviteye yerleştirilmesinden oluştuğu anlamına gelmez. Birçok üründe ince bir başlangıç tabakasının yüzeye aktif olarak adapte edilmesi ve ardından ışıkla polimerizasyon önerilir. Uygulama süresi ve tabaka kalınlığı materyalin formülasyonuna göre değişir (Delgado et al., 2026).

Vertise Flow için 0,5 mm'den ince ilk tabakanın yaklaşık 15–20 saniye orta basınçla adapte edilmesi ve 20 saniye ışıkla polimerize edilmesi önerilmektedir (Delgado et al., 2026). Buna karşılık Czasch ve Ilie (2013), laboratuvar koşullarında 2 mm'yi aşmayan tabakalarda 40 saniyelik ışınlamanın daha yüksek dönüşüm derecesi ve mikromekanik özellikler için gerekli görüldüğünü bildirmiştir. Bu nedenle üretici talimatları ile laboratuvar koşulları birbirinden ayrılmalı ve bir ürüne ait protokol başka bir materyale doğrudan aktarılmamalıdır (Czasch & Ilie, 2013; Delgado et al., 2026).

Ayrı adeziv basamağının kaldırılması ve bazı ürünlerde ek asitlemeye gereksinim olmaması toplam uygulama süresini kısaltabilir. Delgado et al. (2026), aktif adaptasyon ve ışınlama dahil edildiğinde uygulama süresinin etch-and-rinse ve self-etch protokollerine göre azalabildiğini bildirmiştir. Daha kısa uygulama süresi, özellikle hasta kooperasyonunun sınırlı olduğu durumlarda klinik avantaj sağlayabilir (Delgado et al., 2026).

5.2. Marjinal Adaptasyon ve Mikrosızıntı

Marjinal uyum, restorasyon-diş arayüzünün bütünlüğü açısından önemlidir. Vichi, Margvelashvili, Goracci, Papacchini ve Ferrari (2013), Vertise Flow'un düşük bağ dayanımına rağmen düşük mikrosızıntı gösterebildiğini ve bağ dayanımı ile marjinal sızdırmazlığın her zaman paralel olmadığını bildirmiştir.

Elraggal et al. (2024), Vertise Flow ve Surefil One'da konvansiyonel kompozit kontrol grubuna göre daha fazla mikrosızıntı ve marjinal boşluk bildirmiştir. Ünlversal adeziv

kullanımı sonuçları iyileştirmiş, ancak kontrol grubunun düzeyine ulaştırmamıştır.

5.3. Klinik Performans

Oz, Ergin, Yalcin Cakir ve Gurgan (2020), beş yıllık takipte kümülatif retansiyon kaybını Vertise Flow grubunda %15,3, kontrol grubunda %7,6 olarak bildirmiştir. Buna rağmen değerlendirilen klinik kriterlerde gruplar arasında anlamlı fark saptanmamıştır. Non-karyöz servikal lezyonlarda ise daha yüksek başarısızlık oranları bildirilmiştir. Çelik, Aka ve Yılmaz (2015), Fusio Liquid Dentin ile restore edilen 40 lezyonun 27'sinde altı ay sonunda retansiyon kaybı saptamıştır.

Besegato, Freire, Zaniboni, Melo ve Silva (2025) ile Miranda et al. (2025), posterior restorasyonlarda kendinden adeziv ve konvansiyonel akışkan kompozitleri karşılaştırmıştır. Marjinal adaptasyon, retansiyon, marjinal renklenme ve postoperatif hassasiyet açısından belirgin fark bildirilmemiştir. Bununla birlikte, Besegato et al. (2025) birçok sonuç için kanıt kesinliğini düşük veya çok düşük olarak değerlendirmiştir. Bu nedenle benzer klinik sonuçlar kesin klinik eşdeğerlik olarak yorumlanmamalıdır (Besegato et al., 2025).

5.4. Çocuk Diş Hekimliğinde Kullanımı

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitlerin kısa uygulama protokolü, çocuk hastalarda klinik işlemi kolaylaştırabilir (Brustolin, Cavalheiro, Castillo, Pereira, & Lenzi, 2026; Delgado et al., 2026). Ayrı asitleme ve adeziv uygulama basamaklarının bulunmaması, özellikle kooperasyonun sınırlı olduğu durumlarda avantaj sağlayabilir (Delgado et al., 2026).

Serin, Yazicioglu, Deveci ve Dogan (2019), süt molarlarında kendinden adeziv akışkan kompozit ile konvansiyonel kompozit kullanılarak hazırlanan 62 oklüzal

restorasyonu bir yıl boyunca değerlendirmiştir. Her iki grupta da restorasyon kaybı görülmemiş; renk uyumu, marjinal adaptasyon, yüzey yapısı, sekonder çürük ve postoperatif hassasiyet açısından anlamlı fark saptanmamıştır.

Pit ve fissür uygulamalarında da olumlu kısa dönem sonuçlar bildirilmiştir. Bhuvaneswari et al. (2022), 6–9 yaşındaki 100 çocukta 200 daimi birinci moları değerlendirmiştir. Kendinden adeziv akışkan kompozitin 6, 12 ve 18. aylardaki tam retansiyon oranları sırasıyla %67, %47 ve %46'dır. Geleneksel fissür örtücüde bu oranlar %41, %8 ve %5 olarak bildirilmiştir. Gisour, Jahanimoghadam ve Aftabi (2024) da 12 aylık takip sonunda kendinden adeziv akışkan kompozitte tam retansiyon ve marjinal bütünlüğün geleneksel rezin esaslı fissür örtücüden daha yüksek olduğunu bildirmiştir.

Daimi molarlardaki Sınıf I restorasyonlarda da kısa dönem klinik sonuçlar olumludur. Pruthi, Pandit, Gugnani, Gupta ve Gaiind (2026), 9–16 yaşındaki çocuklarda Constic'i iki farklı self-etch (kendinden pürüzlendirmeli) adeziv sistemle karşılaştırmıştır. Altı aylık takipte retansiyon, anatomik form, sekonder çürük, marjinal renklenme ve postoperatif hassasiyet açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Brustolin et al. (2026) tarafından yapılan laboratuvar çalışmasında, süt molarlarındaki oklüzo-proksimal restorasyonlarda Yflow SA kullanımının restorasyon süresini azalttığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, kendinden adeziv materyalle hazırlanan restorasyonların kırılma direnci konvansiyonel materyallerden daha düşük bulunmuştur.

5.5. Klinik Kullanım Alanları ve Sınırlılıklar

Mevcut kanıtlar, küçük ve retantif oklüzal restorasyonlarda kısa ve orta dönem sonuçların genel olarak kabul edilebilir olduğunu göstermektedir (Besegato et al., 2025; Miranda et al., 2025). Pit ve fissür uygulamalarında da olumlu

kısa dönem retansiyon sonuçları bildirilmiştir (Bhuvaneswari et al., 2022; Gisour et al., 2024). Non-karyöz servikal lezyonlarda ise retansiyon daha sorunludur (Çelik et al., 2015). Düşük bağ dayanımı temel sınırlılıklardan biridir (David et al., 2022). Su sorpsiyonu, çözünürlük ve yaşlanmaya bağlı mekanik değişimler uzun dönem performansı etkileyebilir (Islam et al., 2026; Yao et al., 2024). Klinik sonuçlara ilişkin kanıt kesinliği birçok ölçüt için düşük veya çok düşüktür (Besegato et al., 2025). Ürünlerin kimyasal yapıları farklı olduğundan, tek bir materyale ait sonuçlar tüm ürün grubuna genellenmemelidir (Delgado et al., 2026).

6. SONUÇ

Kendinden adeziv akışkan rezin kompozitler, ayrı adeziv basamağını ortadan kaldırarak uygulamayı basitleştirmeyi amaçlayan materyallerdir (Delgado et al., 2026). Bağ dayanımları çoğunlukla konvansiyonel adeziv sistemlerden daha düşüktür (David et al., 2022). Buna karşın küçük ve retantif oklüzal restorasyonlarda kısa ve orta dönem klinik sonuçlar genel olarak kabul edilebilir görünmektedir (Besegato et al., 2025; Miranda et al., 2025). Ürünler arasındaki kimyasal ve performans farklılıkları nedeniyle bu materyaller, konvansiyonel adeziv-kompozit sistemlerin doğrudan alternatifi olarak değil, uygun endikasyonlarda kullanılabilecek bir seçenek olarak değerlendirilmelidir (Delgado et al., 2026; Yao et al., 2024).

KAYNAKÇA

- Al-Saud, L. M., Aodah, A. H., & Abu Asab, O. A. (2022). Do self-adhesive resin composites release more monomers? A comparative high-performance liquid chromatographic analysis. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 24(1), 301–312. <https://doi.org/10.3290/j.jad.b3240709>
- Alves, M., Alves, C., Silva, D. C., & Delgado, A. H. S. (2026). Design of experiments (DOE) approach for multi-response optimization of experimental self-adhesive flowable resin composites. *Dental Materials*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2026.07.012>
- Avcılar, İ. H., Bakır, E. P., Bakır, Ş., & Irtegun Kandemir, S. (2026). Evaluation of the cytotoxicity of flowable composite resins with different compositions: In vitro study. *BMC Oral Health*, 26(1), 297. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07647-y>
- Bektas, O. O., Eren, D., Akin, E. G., & Akin, H. (2013). Evaluation of a self-adhering flowable composite in terms of micro-shear bond strength and microleakage. *Acta Odontologica Scandinavica*, 71(3–4), 541–546. <https://doi.org/10.3109/00016357.2012.696697>
- Besegato, J. F., Freire, A., Zaniboni, J. F., Melo, G. L., & Silva, A. M. (2025). Clinical performance of self-adhesive resin composite direct restorations in permanent teeth: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 29(8), 375. <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06451-w>
- Bhuvaneswari, P., Vinay, C., Uloopi, K. S., RojaRamya, K. S., Chandrasekhar, R., & Chaitanya, P. (2022). Clinical evaluation of the retention of self-adhering flowable

- composite as fissure sealant in 6–9-year-old children: A randomized controlled trial. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 15(3), 322–326. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-2382>
- Brewster, J., & Roberts, H. W. (2023). 12-month flexural mechanical properties of conventional and self-adhesive flowable resin composite materials. *Dental Materials Journal*, 42(4), 598–609. <https://doi.org/10.4012/dmj.2023-011>
- Brustolin, T. Z., Cavalheiro, C. P., Castillo, D. C., Pereira, G. K. R., & Lenzi, T. L. (2026). Self-adhesive flowable resin composite for occluso-proximal restorations in primary teeth: Restorative time and fracture resistance analysis. *Journal of Applied Oral Science*, 34, e20260045. <https://doi.org/10.1590/1678-7765-2026-0045>
- Çelik, E. U., Aka, B., & Yilmaz, F. (2015). Six-month clinical evaluation of a self-adhesive flowable composite in noncarious cervical lesions. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 17(4), 361–368. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a34556>
- Çetin, T., Kitagawa, H., Yamaguchi, S., Kusdemir, M., Sasaki, J.-I., & Imazato, S. (2026). Antibacterial, mechanical, and bonding properties of self-adhesive resin composites containing surface pre-reacted glass ionomer filler. *Dental Materials Journal*, 45(2), 186–192. <https://doi.org/10.4012/dmj.2025-287>
- Czasch, P., & Ilie, N. (2013). In vitro comparison of mechanical properties and degree of cure of a self-adhesive and four novel flowable composites. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 15(3), 229–236. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a29530>

- David, C., Cardoso de Cardoso, G., Isolan, C. P., Piva, E., Moraes, R. R., & Cuevas-Suárez, C. E. (2022). Bond strength of self-adhesive flowable composite resins to dental tissues: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 128(5), 876–885. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.02.020>
- Delgado, A. H. S., Alves, M., Pires, I., Nunes Ferreira, M., & Cuevas-Suárez, C. E. (2026). Self-adhesive flowable resin composites—Are we going somewhere? *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 38(2), 287–306. <https://doi.org/10.1111/jerd.70048>
- Elraggal, A., Abdel Raheem, I., Holiel, A., Alhotan, A., Alshabib, A., Silikas, N., . . . Afifi, R. R. (2024). Bond strength, microleakage, microgaps, and marginal adaptation of self-adhesive resin composites to tooth substrates with and without preconditioning with universal adhesives. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 26, 53–64. <https://doi.org/10.3290/j.jad.b4949691>
- Gisour, E. F., Jahanimoghadam, F., & Aftabi, R. (2024). Comparison of the clinical performance of self-adhering flowable composite and resin-based pit and fissure sealant: A randomized clinical trial in pediatric patients. *BMC Oral Health*, 24(1), 943. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04449-6>
- Hayashi, K., Ishii, R., Takamizawa, T., Aoki, R., Muto, R., Suda, S., . . . Miyazaki, M. (2024). Influence of etching mode on bonding performance of self-adhesive flowable resin composites to bovine teeth. *Dental Materials Journal*, 43(3), 338–345. <https://doi.org/10.4012/dmj.2023-226>
- Islam, M. S., Padmanabhan, V., Wahbeh, N. F., Almaghribi, L. Y., Hashim, N. T., Aryal A C, S., . . . Rahman, M. M. (2026). Bonding performance, mass stability and mechanical

- properties of self-adhesive resin composites and conventional dental composites: A comparative laboratory evaluation. *Polymers*, 18(17), 2132. <https://doi.org/10.3390/polym18172132>
- Leal, C. de F. C., Viana, B. B., Miranda, S. B., Lima, R. B. W. E., Silva, C. C. S., Lins, R. B. E., . . . Montes, M. A. J. R. (2024). Assessment of surface roughness, color, and bonding efficacy: Self-adhesive vs. conventional flowable resin. *Polymers*, 16(18), 2556. <https://doi.org/10.3390/polym16182556>
- Malavasi, C. V., Macedo, E. M., Souza, K. da C., Rego, G. F., Schneider, L. F. J., & Cavalcante, L. M. (2015). Surface texture and optical properties of self-adhering composite materials after toothbrush abrasion. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 16(10), 775–782. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-1756>
- Mine, A., De Munck, J., Van Ende, A., Poitevin, A., Matsumoto, M., Yoshida, Y., . . . Van Meerbeek, B. (2017). Limited interaction of a self-adhesive flowable composite with dentin/enamel characterized by TEM. *Dental Materials*, 33(2), 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.11.010>
- Miranda, S. B., Leal, C. de F. C., de Mendonça, G. L., Lima, R. B. W. E., de Andrade, A. K. M., Lins, R. B. E., & Montes, M. A. J. R. (2025). Clinical performance of self-adhesive vs. conventional flowable resin composite restorations in posterior teeth: A systematic review and meta-analysis of randomized trials. *Journal of Clinical Medicine*, 14(16), 5862. <https://doi.org/10.3390/jcm14165862>
- Nakano, E. L., de Souza, A. S. C., Boaro, L. C. C., Catalani, L. H., Braga, R. R., & Gonçalves, F. (2020). Polymerization stress and gap formation of self-adhesive, bulk-fill and

- flowable composite resins. *Operative Dentistry*, 45(6), E308–E316. <https://doi.org/10.2341/19-166-L>
- Ohlsson, E., Bolay, C., Arabulan, S., Galler, K. M., Buchalla, W., Schmalz, G., & Widbiller, M. (2024). In-vitro-cytotoxicity of self-adhesive dental restorative materials. *Dental Materials*, 40(4), 739–746. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.015>
- Oz, F. D., Ergin, E., Yalcin Cakir, F., & Gurgan, S. (2020). Clinical evaluation of a self-adhering flowable resin composite in minimally invasive Class I cavities: 5-year results of a double blind randomized, controlled clinical trial. *Acta Stomatologica Croatica*, 54(1), 10–21. <https://doi.org/10.15644/asc54/1/2>
- Poitevin, A., De Munck, J., Van Ende, A., Suyama, Y., Mine, A., Peumans, M., & Van Meerbeek, B. (2013). Bonding effectiveness of self-adhesive composites to dentin and enamel. *Dental Materials*, 29(2), 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.10.001>
- Pruthi, T., Pandit, I. K., Gugrani, N., Gupta, M., & Gaiind, S. (2026). Comparative evaluation of the clinical performance of two-step and one-step self-etching adhesive systems and self-etching self-adhesive composite in permanent molars in pediatric patients: A three-arm parallel randomized clinical study. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 19(4), 425–432. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-3489>
- Sampaio, C. S., Chiu, K.-J., Farrokhmanesh, E., Janal, M., Puppini-Rontani, R. M., Giannini, M., . . . Hirata, R. (2017). Microcomputed tomography evaluation of polymerization shrinkage of Class I flowable resin

- composite restorations. *Operative Dentistry*, 42(1), E16–E23. <https://doi.org/10.2341/15-296-L>
- Serin, B. A., Yazicioglu, I., Deveci, C., & Dogan, M. C. (2019). Clinical evaluation of a self-adhering flowable composite as occlusal restorative material in primary molars: One-year results. *European Oral Research*, 53(3), 119–124. <https://doi.org/10.26650/eor.20190025>
- Sibai, N., El Mourad, A., Al Suhaibani, N., Al Ahmadi, R., & Al Dosary, S. (2022). Shear bond strength of self-adhesive flowable resin composite. *International Journal of Dentistry*, 2022, 6280624. <https://doi.org/10.1155/2022/6280624>
- Vichi, A., Margvelashvili, M., Goracci, C., Papacchini, F., & Ferrari, M. (2013). Bonding and sealing ability of a new self-adhering flowable composite resin in Class I restorations. *Clinical Oral Investigations*, 17(6), 1497–1506. <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0846-6>
- Yao, Y., Wu, D., Cifuentes-Jimenez, C. C., Sano, H., Alvarez-Lloret, P., Yamauti, M., & Tomokiyo, A. (2024). Comprehensive evaluation of long-term dentin bond strength, water sorption, solubility, and degree of conversion of self-adhesive resin composites. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 26, 213–222. <https://doi.org/10.3290/j.jad.b5749506>
- Yeloğlu-Akbuar, Ç., Sarıalioğlu Güngör, A., Öztürk, İ., & Dalkılıç, E. (2026). In vitro evaluation of physical properties and bacterial adhesion of different self-adhesive flowable composite resins. *Dental Materials*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2026.06.008>

RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİNDE
GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK
DEĞERLENDİRMELER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com