

# Strojna instrumentacija korijenskih kanala

Maja Perkušić, Dora Prolić [1]

dr. sc. Ivan Šalinović [2]

[1] studentice šeste godine, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[2] Zavod za endodonciju i restaurativnu stomatologiju, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

## SAŽETAK

Strojna instrumentacija nikal-titanskim (NiTi) instrumentima predstavlja značajan napredak u endodontskoj terapiji, omogućujući učinkovitiju i sigurniju obradu korijenskih kanala. NiTi legure, prvotno razvijene za industrijske potrebe, zahvaljujući superelastičnosti i učinku pamćenja oblika, pokazale su se izuzetno korisnima u stomatološkoj praksi. Tijekom godina razvijene su različite generacije termomehanički obrađenih legura i instrumenata poboljšane fleksibilnosti, otpornosti na lom i sposobnosti prilagodbe anatomiji kanala. Električni endodontski motori omogućuju različite oblike kretanja instrumenata: kontinuiranu rotaciju, recipročnu kretnju, adaptivne sustave i vibracijske tehnike. Tehničke karakteristike i kinematika kretanja značajno utječu na učinkovitost preparacije i smanjenje rizika od frakture. U novije vrijeme sve veću popularnost dobivaju single-file tehnike zbog brzine izvođenja i jednostavnosti primjene. Iako strojna instrumentacija donosi brojne prednosti u odnosu na ručne tehnike, izazovi ostaju – uključujući višu cijenu, nedostatak standardizacije i rizik od loma instrumenata. Na frakture najviše utječu ciklički zamor, torzijska opterećenja, kompleksnost anatomije i iskustvo operatera. Osiguranje *glide patha*, pravilna primjena instrumenata i pridržavanje uputa proizvođača ključni su za sigurnu instrumentaciju. Optimalan terapijski ishod postiže se kombinacijom strojne i ručne tehnike, individualiziranim pristupom i stalnim stručnim usavršavanjem kliničara.

**Ključne riječi:** endodontska terapija, preparacija korijenskih kanala, dentalni instrumenti, nikal, titan

## Uvod

Ishod endodontskog zahvata ovisi o pravilnoj dijagnostici te adekvatnoj mehaničkoj obradi, dezinfekciji i obturaciji korijenskih kanala, kao i pravovremenoj postendodontskoj opskrbi zuba (1). Ranije su za instrumentaciju korijenskih kanala najčešće bili korišteni ručni instrumenti od nehrđajućeg čelika, a njihova proizvodnja standardizirana je prema ISO normama (2). Uvođenje nikal-titanskih legura (NiTi) te kasnija automatizacija mehaničke obrade označili su početak nove ere u endodonciji (3). Danas endodonti imaju pristup širokom rasponu sustava instrumenata za obradu korijenskih kanala koji se razlikuju prema dizajnu, načinu izrade te indikacijama (1).

Međutim, NiTi instrumenti za strojnu obradu kanala nemaju jedinstveni standard kojemu bi morali udovoljavati pa proizvođači dizajniraju geometriju aktivnog dijela instrumenata na nestandardiziran način, nastojeći uvesti nove prednosti u obradi korijenskih kanala (2). Uvođenje strojne instrumentacije revolucioniralo je endodonciju, uz poboljšanje kvalitete i predvidljivosti pripreme kanala te značajno smanjenje pogrešaka (3). Instrumenti su kontinuirano poboljšavani kroz unapređenja u metalurgiji, površinskoj i termičkoj obradi, značajkama dizajna te načinu kretanja instrumenata (4). Velika raznolikost NiTi sustava na tržištu i nedostatak standardizacije

takvih instrumenata otežavaju izbor odgovarajućeg sustava u svakom pojedinačnom slučaju (2).

## NiTi legura

Legura nikla i titana izvorno je razvijena za američki svemirski program u Naval Ordnance Laboratory 1963. godine i dobila je generički naziv „Nitinol“ (5). U dentalnoj medicini prvi su je put upotrijebili Andreasen i Hilleman 1971. godine za izradu ortodontskih žica, zbog niskog modula elastičnosti, efekta memorije oblika i superelastičnosti (6). Civjan i sur. 1975. godine prvi su predstavili koncept izrade endodontskih instrumenata od NiTi legure (7). Kasnije, 1988. godine, Walia, Brantley i Gerstein predstavili su prve ručne NiTi endodontske instrumente (8).

Dugi niz godina ti su instrumenti izrađivani isključivo konvencionalnom strojnom obradom, uz varijacije uglavnom u obliku poprečnog presjeka, rasporedu reznih površina duž aktivnog dijela te prisutnosti ili odsutnosti radijalnih površina. Glavni cilj bio je poboljšati rezna svojstva instrumenta te smanjiti rizik od loma. Termičke obrade NiTi legura, uvedene od 1999. godine, bile su glavni faktor odgovoran za promjenu kliničkog ponašanja ovih instrumenata (3). Razlozi zbog kojih su NiTi instrumenti uvršteni u endodontski instrumentarij su poboljšana fizička svojstva u odnosu na nehrđajući čelik (8) u smislu fleksibilnosti (9), učinkovitosti i sposobnosti rezanja (10–12). Nikal-titan legura koja se koristi u endodontskim instrumentima sadrži približno 56% masenog udjela nikla i 44% titana što rezultira atomskim omjerom gotovo jedan na prema jedan (13). Ova ekvivalentna legura NiTi može postojati u tri različite, temperaturno ovisne kristalne mikrostrukture: austenit, martenzit i R-faza (14).

**Austenitna faza** naziva se i visokotemperaturna faza. Konvencionalna NiTi legura je u ovoj fazi na sobnoj temperaturi. Karakterizira je elastično ponašanje ili sposobnost materijala da se vrati u prvobitni oblik nakon deformacije, svojstvo superelastičnosti. Da bi se iskoristila superelastičnost NiTi legure, ona se većinom mora sastojati od austenitne faze (2).

**Martenzitna faza** naziva se i niskotemperaturna faza. Karakterizira je plastično ponašanje; nakon prestanka djelovanja sile, legura zadržava deformirani oblik (2). Martenzitna legura NiTi mekša je i duktilnija

od austenitne. Lako se može deformirati i pokazuje sposobnost pamćenja oblika (engl. *shape memory*) kada se zagrije. Otpornost na zamor i lom martenzitne faze je veća od stabilnog austenita (15). Stoga, da bi iskoristili prednosti martenzitne faze, NiTi legure se termomehanički obrađuju tj. podiže se temperatura transformacije u austenit (3).

**R-faza** ili premartenzitna faza se nalazi u vrlo uskom pojasu između prijelaznih temperatura (2). Može se pojaviti u određenim uvjetima prilikom transformacije iz austenitne (kubične) u martenzitnu (monoklinsku) fazu kao romboidna faza (13).

NiTi legura je na relativno visokoj temperaturi u austenitnoj fazi. Ako se legura ohladi kristalna struktura se počinje mijenjati u martenzitnu fazu sve dok svi kristali legure nisu u martenzitnoj formi. Temperature ove martenzitne transformacije (MT) određene su kao temperatura započinjanja martenzitne transformacije (Ms) i završna temperatura martenzitne transformacije (Mf). Temperaturni raspon u kojem se događa martenzitna transformacija naziva se temperaturni raspon transformacije (TTR). MT se inducira smanjenjem temperature ili primjenom naprezanja. MT inducirana naprezanjem (npr. kod obrade korijenskog kanala) događa se zbog sposobnosti preorijentacije kristalne strukture NiTi legure, a ne dolazi do trajne deformacije kao kod većine metala. Sličan fenomen događa se i u suprotnom smjeru te se zove austenitna transformacija. Određena je početnom temperaturom austenitne transformacije (As) i završnom temperaturom austenitne transformacije (Af), a temperaturni raspon u kojem se to događa naziva se temperaturni raspon obrnute transformacije (RTTR). Sposobnost izmjene faza daje NiTi leguri dva karakteristična svojstva: superelastičnost i pamćenje oblika (2,16).

**Superelastičnost** je svojstvo legure da promjeni oblik pod utjecajem mehaničkog stresa (2). Ova reverzibilna promjena posljedica je promjene kristalne strukture iz austenita u martenzit koji može podnijeti deformaciju do 8% bez naprezanja (17). Austenitna legura transformira se u martenzitnu djelovanjem mehaničkog stresa, npr. umetanje instrumenta u zakrivljeni korijenski kanal. Budući da martenzitno stanje legure izazvano stresom nije stabilno na sobnoj temperaturi, rasterećenjem endodontskog instru-

menta, tj. izvlačenjem iz korijenskog kanala, dolazi do retransformacije u austenitno stanje, a time i do vraćanja u izvorni oblik (13).

**Pamćenje oblika** (engl. *shape memory*) je svojstvo deformirane NiTi legure da se vrati u svoj originalni oblik kada se zagrije, transformacijom stabilnog deformiranog martenzita u stabilni austenit (13). Ako je legura u martenzitnoj fazi i na nju primijenimo vanjsku silu, kao što je ona pri obradi korijenskog kanala, lako će se deformirati. Deformirana legura se može vratiti u početni oblik tako da je zagrijemo npr. u autoklavu (2).

Velika poboljšanja mehaničkih svojstava postignuta su suptilnim izmjenama omjera dvaju ele-

menta, no ključni korak je bio **termomehanička obrada NiTi legure**. Termomehaničkom obradom prilagođavaju se prijelazne temperature legure. Klasična NiTi legura je u austenitnoj fazi tijekom kliničke primjene, dok termomehanički obrađene NiTi legure sadrže i promjenjive količine R-faze i martenzitne faze u kliničkim uvjetima. Postoji raspon temperatura na kojima se legura transformira, ona nije u potpunosti u martenzitnoj ili austenitnoj fazi, nego u kombinaciji obje (2). Tijekom godina pojavilo se više vrsta legura s različitom termomehaničkom obradom koje su podijeljene u sedam generacija, u svrhu poboljšanja fleksibilnosti i otpornosti na lom (13). (Tablica 1)

Tablica 1. Svojstva niki-titanskih instrumenata različitih generacija. (Preuzeto iz 12)

Generacija	Poprečni presjek	Legura	Karakteristike	Primjeri instrumenata
1	U- oblik	Konvencionalna NiTi	Pasivno rezanje (zaobljeni, nerezajući vrhovi), fiksni konus, Neutralni/negativni kutovi rezanja dentina, lom instrumenta	ProFile (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)
2	Triangularan, konveksan	Konvencionalna NiTi	Aktivno rezanje, višestruki konus, pozitivni kutevi rezanja, površinska obrada elektrokemijskim poliranjem nakon procesa brušenja	Pro Taper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)
3	Triangularan, konveksan ili četverolinijski	Toplinski obrađena	Napredak u metalurškoj toplinskoj obradi legure, „M-wire“, „R-phase“, „CM-wire“, kontinuirana rotacija u smjeru kazaljke na satu	Hyflex CM (Coltene, Altstätten, Switzerland)
4	Triangularan, konveksan ili četverolinijski	Toplinski obrađena	Promjene u kinematici, „recipročni pokreti“, „single-file-single use system	WaveOne, (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland, Self-adjusting file (SAF)
5	Četverolinijski, ekscentrično položen	Toplinski obrađena	Promjene u dizajnu instrumenta, „off-centred cross-section“, valovito gibanje u rotaciji	ProTaper Next (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)
6	Varijabilan	Konvencionalna NiTi ili toplinski obrađena	Uvođenje glide-path instrumenata, instrumenata za reviziju i modifikaciju ulaza u kanal	ProGlider i Pro Taper Retreatment kit (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) Self-adjusting file (ReDent Nova, Ra'nana, Izrael) XP Finisher (FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, Switzerland)
7	varijabilan	Toplinski obrađena	Nove metode proizvodnje: „twisting“, „shape-setting“, „electric discharge machining“	TRUShape (Dentsply Tulsa Dental, Tulsa OK, USA) XPShaper (FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, Switzerland) Self-adjusting file (ReDent Nova, Ra'nana, Izrael)

### Konvencionalna NiTi slitina (~56% Ni, 44%Ti)

Austenit završna temperatura je ispod tjelesne temperature, stoga se konvencionalni NiTi instrumenti sastoje od pretežito austenit faze te posjeduju superelastična svojstva [OneShape, ProFile, ProTaper Universal]. (13, 17)

**M-wire** (2007.): M-wire je legura koja nastaje toplinskom obradom konvencionalne austenitne NiTi legure. U složenim temperaturnim uvjetima, konvencionalna NiTi legura s austenitom kao glavnom fazom se priprema posebnim tretmanom istezanja. Pri tome se temperatura prijelazne kristalne faze povećava sa 16-31 °C konvencionalne NiTi legure na 47 °C (14). U kliničkim uvjetima ima i male količine R i martenzitne faze. Pokazuje veću fleksibilnost, bolja mehanička svojstva i veću otpornost na ciklički zamor (veći modul elastičnosti od austenita), što se može pripisati prisutnosti ove dvije faze. [ProFile Vortex, ProFile GT Series X, ProTaper Next, Reciproc, WaveOne] (13).

**R-faza** (2008.): U R-faznim NiTi sustavima iz konvencionalne austenitne legure se nakon višestruke toplinske obrade stvara dodatna fazna promjena u kristalnoj strukturi, R-faza. Kao što je navedeno, R- faza se javlja tijekom martenzitne transformacije hlađenjem u R- fazu i obrnuto (3). Koristi se za proizvodnju sustava *Twisted File* kao što je K-file. [Twisted File, Twisted File Adaptive, K3XF (not twisted)] (13, 14).

**CM-wire** (engl. *controlled memory*) (2008.): U usporedbi s konvencionalnom NiTi žicom, CM NiTi legura ima manje nikla (52 %) što poboljšava mehanička svojstva. CM žica je prva termomehanički obrađena NiTi legura koja nema superelastična svojstva ni na sobnoj ni na tjelesnoj temperaturi. Na sobnoj temperaturi u kristalnoj rešetki dominira martenzit jer je temperatura prijelaza u austenit podignuta na 55 °C (14). Lako se deformira pod mehaničkim naponom, ali će se nakon zagrijavanja u autoklavu ponovno vratiti u originalan oblik (Shape memory effect). Za razliku od austenitnih legura, CM Wire instrumenti nemaju tendenciju u potpunosti se izravnati nakon preparacije zavijenih kanala. Instrument ostane u obliku u kojem obrađuje kanal i nakon instrumentacije. To se zove kontrolirani memorijski



Slika 1. Različiti toplinski tretman instrumenata istog proizvođača.

efekt i trebao bi smanjiti incidenciju pogrešaka tijekom preparacije korijenskih kanala (13).

- **BLUE AND GOLD heat treated** (2012.): To su legure CM žice koje se podvrgavaju ponovljenim obradama zagrijavanjem i hlađenjem kako bi se dobio sloj titanovog oksida koji daje prepoznatljivu boju tim legurama. Boja površine varira o debljini oksidnog sloja na površini instrumenta. Kada je debljina 60-80 nm boja površine je plava, a kada je debljina 100-140 nm boja površine je zlatna. Sloj titanovog oksida nadoknađuje tvrdoću izgubljenu tijekom obrade legure CM žice i povećava učinkovitost rezanja i otpornost na habanje (14). Svi Blue and Gold heated instrumenti pokazuju poboljšanu fleksibilnost i otpornost na zamor u usporedbi s konvencionalnim NiTi legurama i M-wire instrumentima što se može pripisati njihovom martenzitnom stanju. (Slika 1) [ProTaper Gold, WaveOne Gold, ProFile Vortex Blue, Reciproc Blue] (13).
- **EDM HYFLEX** (2016.): Ova legura od CM žice proizvodi se uz pomoć tehnologije obrade električnim pražnjenjem (engl. *electrical discharge machining*). EDM je proces toplinske erozije, koji se koristi s električno vodljivim materijalima, a rezultira kraterastom površinom instrumenta.



Pokazuje značajno veću čvrstoću i otpornost na ciklički zamor, a istu fleksibilnost kao CM žica. [HyFlex EDM, Coltene, Altstätten, Switzerland] (2,3)

**MAX WIRE** (2016.): Prva NiTi legura koja kombinira učinak pamćenja i superelastičnost u kliničkoj primjeni. Pokazuje *shape memory* efekt kada se umetne u korijenski kanal, a svojstvo superelastičnosti tijekom obrade. Martenzitno stanje na sobnoj temperaturi (20 °C) mijenja se u austenitni oblik kada su izloženi temperaturi unutar kanala (tjelesna temperatura, 35 °C). [XP-endo Finisher, XP-endo Shaper] (2,13).

### Vrste kretanja električnih endodontskih motora

Električni endodontski motori mogu se klasificirati u nekoliko vrsta: motor s kontinuiranom rotacijom i kontroliranim zakretnim momentom (engl. *torque*), motor s recipročnom (naizmjeničnom) rotacijom, adaptivne rotacijske sustave te motor s uzdužnim kretanjem (SAF). (Slika 2)

#### Rotacijski sustavi

Motori s kontinuiranom rotacijom najčešće su korišteni motori za pogon NiTi instrumenata, pri čemu su brzina i zakretni moment unaprijed određeni prema uputama proizvođača. Kada instrument naiđe na otpor pri rotaciji koji premašuje unaprijed zadanu vrijednost, motor automatski mijenja smjer rotacije kako bi se instrument rasteretio i povukao iz korijenskog kanala te time smanjio rizik od torzijskog loma. U većini NiTi sustava instrument se pokreće električ-

nim motorima i redukcijskim koljenastim kontraktivnim nastavcima koji omogućuju kontinuirano rezanje stijenki korijenskog kanala punom rotacijom, uključujući centrično i ekscentrično rotacijsko gibanje unutar kanala. Instrumenti s centričnim rotacijskim kretanjem, poput sustava **ProTaper Universal** (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) odlikuju se visokom učinkovitošću rezanja, no lako mogu zaglaviti u dentinu i biti skloni lomu. Križni poprečni presjek kod **ProTaper Next** (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) i **XP-endo Shaper** (FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, Switzerland) instrumenata omogućuje ekscentrično ili asimetrično rotacijsko gibanje s većom kontaktnom površinom instrumenta i kanala, čime se povećava učinkovitost u uklanjanju debrisa (14).

Dolazak **ProTaper sustava** (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) na tržište predstavljen je kao revolucija. Ovaj sustav nije se isticao oblikom presjeka, već varijabilnim konusom duž instrumenta, što omogućava da svaki instrument djeluje u specifičnom dijelu kanala i omogućava korištenje kraće sekvence instrumenata. Takav dizajn smanjuje kontakt instrumenta s kanalnim stijenkama, čime se smanjuje mogućnost zaglavljenja u obliku vijka te se povećava učinkovitost i omogućuje konzervativnije očuvanje koronarnog dentina nego s fiksnim konusom (18).

NiTi rotacijska obrada obično se izvodi postupnim pristupom koristeći koronarnu ekspanziju (engl. *coronal flaring*); međutim, specifična tehnika ovisi o odabranom sustavu instrumenata. Osim uputa proizvođača za pojedine instrumente, postoje i opća



Slika 2. Različiti tipovi endomotora koji podržavaju rotacijsku i recipročnu kretnju.  
 a. X-Smart Plus (Dentsply Maillefer, Tulsa, OK, SAD),  
 b. E-Connect S (Eighteeth, Changzhou, Kina),  
 c. X-Smart Pro Plus (Dentsply, Charlotte, NC, SAD),  
 d. VDW Gold Reciproc (VDW, München, Njemačka)

pravila koja treba slijediti. Preporučeno je da se NiTi rotacijski instrumenti ne uvode u korijenske kanale koji prethodno nisu istraženi ručnim instrumentima. U kombiniranoj tehnici ručni instrumenti formiraju tzv. *glide path*, kojim zatim mogu sigurno proći rotacijski instrumenti (19, 20).

Rotaciju instrumenta uvijek započinjemo izvan kanala te slijedimo kontinuirane *in-and-out* pokrete. Svaki korak instrumentacije trebao bi uključivati tri do pet pokreta u irigiranom kanalu, a trajanje ne bi smjelo prelaziti 10 do 15 sekundi. Sila usmjerena prema apikalno ne bi smjela premašiti silu potrebnu za savijanje rotacijskog instrumenta na ravnoj površini. Instrumenti od austenitne legure najbolje djeluju pri nižim rotacijskim brzinama (250-300 okretaja u minuti – rpm). Međutim, martenzitni instrumenti bolje funkcioniraju pri višim brzinama (500 rpm) (21) Tulsa, OK.

Rotacijski instrumenti primjenjuju se **crowndown tehnikom** (22). Konstruirani su tako da radi samo jedan dio instrumenta, time se smanjuje kontaktna površina instrumenta sa stijenkom kanala čime se smanjuju torzijske sile (npr. ProTaper Next). Ima dvotočkasti radni brid kojim postiže kontakt s dentinom u dvije točke, dok ostale plohe uklanjaju debris. Instrumenti se načelno mogu podijeliti u tri vrste: *glide path*, *shaping* i *finishing* instrumente. Za početno proširenje koronarnog dijela i osiguravanje sigurnog prolaska ostalih instrumenata kroz korijenski kanal koriste se *glide path* instrumenti. Ovaj korak osigurava prostor za hipoklorit, olakšava ispiranje i uklanja koronarne prepreke, a nakon toga se radna duljina (engl. *working length*, WL) mora potvrditi s pomoću ručnog instrumenta (npr. 10 ili 15 K-file). *Shaping* instrument ima veći promjer koronarno te ide do prethodno određene radne duljine, pri tome se instrumentira samo gornja trećina kanala. *Finishing* instrumenti imaju veći promjer apikalno tako da obrađuju apikalniji dio kanala (19).

### Recipročni sustavi

Godine 2008. Yared je predložio koncept recipročnog kretanja NiTi sustava pogonjenog motorom, temeljen na ručnoj tehnici balansirane sile (engl. *balanced-force technique*) (23), pri čemu se korijenski kanal oblikuje pokretima različitih iznosa kutova u smjeru kazaljke

na satu (engl. *clockwise*, CW) i suprotno od kazaljke na satu (engl. *counterclockwise*, CCW). Na tržištu su se pojavili brojni single-file NiTi sustavi poput **Reciproc** i **Reciproc Blue** (VDW GmbH, München, Njemačka), **WaveOne** i **WaveOne Gold** (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland). Većina reciprocirajućih sustava rotira CCW pod kutom od 120°–270° kako bi rezali dentin, dok se zatim pokretom CW pod kutom od 60°–90° uklanja debris, što smanjuje torzijski stres i omogućuje međufazno rasterećenje (14).

Glavna razlika ovih instrumenata je što imaju smjer rezanja CCW, pa aktivno režu kada je kut rotacije CCW veći od kuta rotacije CW, pri čemu je za ostvarenje punog kruga od 360° potrebno više uzastopnih recipročnih ciklusa. Ova karakteristika proizlazi iz njihovog poprečnog presjeka, gdje je kut rezanja sa stijenkom kanala negativan, a postaje pozitivan ako se instrument rotira suprotno od smjera kazaljke na satu. Osim tih instrumenata, svi ostali instrumenti dizajnirani su za kretanju u smjeru kazaljke na satu, što znači da imaju pozitivan kut rezanja (18).

**Reciproc** sustav je reprezentativan primjer upotrebe reciprocirajućeg kretanja, s rotacijom od 150° CCW i 30° CW. Na toj osnovi, sustav **Reciproc Blue CM** pokazuje visoku otpornost na ciklički zamor materijala i dobru fleksibilnost zahvaljujući toplinskoj obradi. **WaveOne Gold**, rotira 170° CCW i 50° CW, a ima četiri rezna brida s kutom rezanja od 85°. Tijekom rada, samo dva rezna ruba instrumenta dolaze u kontakt sa svakim 200 µm opsega stijenke korijenskog kanala (14).

### Postoje dvije vrste motora s opcijom recipročnog kretanja:

- **Otvoreni motori**, koji omogućuju modifikaciju kutova rotacije CW/CCW te brzinu rotacije. Svaki proizvođač određuje optimalan kut rotacije kako bi se što bolje iskoristila svojstva instrumenta. Npr. ATR Vision (ATR, Pistoia, Italija), iEndo Dual (Acteon, Mérignac, Francuska) i SAF system pro (ReDent Nova, Ra'nana, Izrael).
- **Zatvoreni motori**, koji su unaprijed programirani i ne dopuštaju nikakve izmjene. Kod ovih motora, instrumenti dizajnirani za kretanju u smjeru kazaljke na satu ne mogu se koristiti u recipročnom načinu jer neće biti u mogućnosti rezati niti napredovati kroz kanal. Za recipročni način rada moraju se ko-

ristiti instrumenti za rezanje suprotno od smjera kazaljke na satu. Neki primjeri takvih motora su: WaveOne (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland), VDW Silver Reciproc (VDW, München, Njemačka) i ATR Technika (ATR, Pistoia, Italija) (2).

### Usporedba rotacijskih i recipročnih sustava

- **Ciklički zamor:** De-Deus et al (24), Gambarini et al (25), and Plotino et al (26) ispitivali su otpornost instrumenata na ciklički zamor pri recipročnom kretanju u usporedbi s kontinuiranom rotacijom. Rezultati su pokazali da recipročni pokret izaziva manji ciklički zamor i produžuje vijek trajanja instrumenta u usporedbi s konvencionalnom rotacijom. Ovo se može objasniti izmjenama pokreta odnosno nekontinuiranom rotacijom, što smanjuje broj ciklusa instrumenta i time smanjuje ciklički zamor na instrumentu (4).
- **Uklanjanje debrisa:** Rezultati istraživanja su pokazali da je uporaba Reciproc i WaveOne instrumenata u recipročnom kretanju rezultirala manjoj količini rezidualnoj debrisa u usporedbi s oblikovanjem kanala izvedenim s ProTaper instrumentima koji koriste rotacijski pokret (27).
- **Ekstruzija debrisa:** Sustavi za potpunu rotacijsku instrumentaciju povezani s manjom apikalnom ekstruzijom debrisa u usporedbi s recipročnim single-file sustavima (28).
- **Redukcija bakterija:** Zaključak istraživanja bio je da su recipročni sustavi doveli do sličnog smanjenja bakterija kao i rotacijski sustavi ili manualna tehnika instrumentacije (29).
- **Očuvanje anatomije korijenskog kanala:** Istraživanje je pokazalo da su modifikacije kanala bile smanjene te da su izvorne konture zakrivljenih kanalima bile bolje očuvane kod recipročnog sustava u odnosu na rotacijski (30).
- **Uklanjanje punila tijekom revizije:** Nakon revizije zaostali materijal za punjenje primijećen je na stijenkama kanala svih uzoraka, bez obzira na korištenu tehniku. Recipročna tehnika bila je najbrža metoda za uklanjanje gutaperke i sealer-a, a nađeno je više apikalno ekstrudiranog materijala kod recipročnog sustava u usporedbi s rotacijskim sustavom za reviziju (31). Rezultati

su pokazali da su i kontinuirani rotacijski pokreti i recipročni pokreti bili jednako učinkoviti u postizanju prohodnosti apikalnog dijela kanala u ravnim ili umjereno zakrivljenim meziobukalnim kanalima mandibularnih molara. Kako se povećavao stupanj zakrivljenosti kanala, recipročni pokret bio je uspješniji od kontinuirane rotacije za ovu svrhu, no ne značajno (32).

### Adaptivni rotacijski sustavi

Adaptivna kretanja je nova, modificirana recipročna kretanja koja ima za cilj kombinirati prednosti rotacijske i recipročne kretnje. Literatura sugerira da adaptivna kretanja ima prednosti u odnosu na jednostavnu rotacijsku kretanju u smislu uklanjanja punila i otpornosti na ciklički zamor (33).

**Twisted File Adaptive tehnika** (SybronEndo, Orange, SAD) je uvedena kako bi se istaknule prednosti recipročne kretnje. To postiže korištenjem patentiranog pokreta, inovativne TF Adaptive tehnologije, koja se automatski prilagođava stresu tijekom instrumentacije.

Kada TF Adaptive instrument nije izložen (ili je vrlo slabo izložen) stresu u kanalu, kretanja se može opisati kao kontinuirana rotacija, što omogućuje bolju učinkovitost rezanja i uklanjanje detritusa. Preciznije, riječ je o prekinutoj kretnji s iznosom kutova CW-CCW: 600°-0°. Ova vrsta kretnje jednako je učinkovita kao kontinuirana rotacija u postraničnom rezanju, pri tome omogućujući optimalne pokrete „četkanja“ te smanjuje jatrogene pogreške smanjujući tendenciju „uvrtanja“ instrumenta (što je često kod nikal-titanskih instrumenata većeg konusa). Zbog povećanog stresa instrumentacije i zamora metala, pokret TF Adaptive instrumenta prelazi u recipročni način dok prolazi kroz kanal, s posebno dizajniranim CW i CCW kutovima koji variraju od 600°-0° do 370°-50°. Ti kutovi nisu konstantni, već se mijenjaju ovisno o anatomskim kompleksnostima i intrakanalnom stresu kojem je instrument izložen. Adaptivni motor automatski bira najbolju kretanju za svaku različitu kliničku situaciju, dok kliničar gotovo ne primjećuje razliku u promjeni pokreta zahvaljujući vrlo sofisticiranom algoritmu koji omogućava glatki prijelaz između različitih kutova (18).



### **Vibracijske tehnike (SAF)/ Motor s uzdužnim kretanjem**

**Self Adjusting File (SAF)** (ReDent Nova, Ra'ana, Izrael) je sustav koji spada u vibracijske tehnike (34). SAF tehnologija omogućuje učinkovito čišćenje i oblikovanje svih varijacija korijenskih kanala te osigurava učinkovitu dezinfekciju. Ovaj sustav koristi šuplji NiTi instrument, bez središnje metalne jezgre, kroz koji se tijekom cijelog zahvata osigurava kontinuirani protok irigacijskog sredstva i omogućava prilagodbu obliku korijenskog kanala (35). Šuplji dizajn omogućuje SAF-u elastičnu kompresiju duž njegovog poprečnog presjeka prilikom umetanja u kanal s uspostavljenom inicijalnom prohodnošću K instrumentom #20. Pokušaj širenja SAF-a stvara lagani, kontinuirani pritisak duž cijelog opsega stijenke korijenskog kanala (36) pri čemu se s cijelog opsega korijenskog kanala uklanja jednoliki sloj dentina, izbjegavajući nepotrebno i prekomjerno uklanjanje intaktnog dentina (35).

Kako bi se prilagodio načinu kretanja koje koristi SAF sustav, električni motor može također pokretati instrument u aksijalnom smjeru, olakšavajući čišćenje nekružnih presjeka korijenskog kanala. Takav tip motora naziva se aksijalni motor. Instrument se kreće u pokretu nalik ubadanju, koji je pokretan koljenastim nastavkom frekvencijom od 3000–5000 vibracija/min i amplitudom od 0,4 mm (14).

Naprezanje koje stvara SAF sustav tijekom rada manje je od naprezanja uzrokovanog rotacijskom instrumentacijom (37). Nekoliko studija pokazalo je da instrumentacija korijenskog kanala SAF sustavom uzrokuje manju učestalost pojave pukotina u dentinu u usporedbi s rotacijskim sustavima (36, 38–40).

### **Single file tehnike**

Svaka nova generacija instrumenata donosi sve razvijenije tehnike preparacije kanala kroz inovacije u dizajnu, načinu kretanja i materijalu. Danas se praktički svi kanali mogu optimalno pripremiti tehnikom jednog instrumenta te endodontska terapija ovim pristupom traje 3–4 puta kraće nego konvencionalnim metodama (36).

- **WAVEONE:** Riječ je o recipročnom sustavu s jednim jednokratnim instrumentom (single-use,

single-file) koji je predstavio Dentsply Maillefer, Ballaigues, Švicarska za potpuno oblikovanje korijenskog kanala od početka do kraja. Instrumenti su izrađeni s pomoću M-Wire tehnologije, čime se postiže poboljšana čvrstoća i otpornost na ciklički zamor i do četiri puta u odnosu na druge rotirajuće Ni-Ti instrumente. Set se sastoji od instrumenata: Small – kontinuirani konus 6 %, Primary i Large – konus 8 % koji se smanjuje prema koronarnom dijelu (WaveOne Gold ima i Medium instrument) (36).

- **RECIPROC:** Ovaj novi sustav koristi recipročni pokret jednim instrumentom, bez prethodne uporabe ručnih instrumenata, a predstavila ga je tvrtka VDW GmbH, München, Njemačka, 2011. godine. Izrađen je od M-žice, koja pruža veću fleksibilnost i otpornost na ciklički umor u usporedbi s tradicionalnim NiTi legurama. Sustav uključuje tri Reciproc instrumenta: R25, R40 i R50 (41). (Slika 3)



Slika 3. Sekvenca instrumenata za recipročnu kretnju sustava VDW RECIPROC®



- **SELF-ADJUSTING FILE (SAF):** SAF je predstavila tvrtka ReDent Nova, prethodno je opisan u tekstu.
- **ONE SHAPE:** Ovaj sustav razvio je Micro Mega, Besancon, Francuska. One Shape predstavlja novi koncept instrumentacije jednim instrumentom izrađenog od konvencionalne austenitne 55-NiTi legure, gdje se cijela preparacija provodi kontinuiranom rotacijom u smjeru kazaljke na satu (36).

### Single-cone tehnika punjenja

Svrha punjenja korijenskog kanala je potpuno hermetičko zatvaranje prostora korijenskog kanala, odnosno trajno brtvljenje apikalnog otvora te lateralnih i akcesornih kanala biološki prihvatljivim materijalom. Cilj je omogućiti cijeljenje periapikalnog tkiva i spriječiti širenje infekcije kroz kanal korijena te onesposobiti mikroorganizme koji mogu ostati nakon instrumentacije i dezinfekcije (42). Koriste se različite tehnike punjenja: hladna i topla lateralna kondenzacija, vruća vertikalna kondenzacija gutaperke i termoplastične tehnike. U novije vrijeme, s napretkom sustava za rotacijsku instrumentaciju, koristi se tehnika jedne gutaperke (engl. **Single-cone** tehnika). Svi sustavi dolaze sa svojim setovima paper pointa i gutaperke koji odgovaraju geometriji NiTi završnih (*finishing*) instrumenata. Upotreba ovih štapića gutaperke ne zahtijeva dodatne sekundarne gutaperke niti lateralnu kondenzaciju (iako ih nužno ne isključuje, ovisno o zahtjevnosti kanala), čime smanjuje pritisak na stijenke korijenskog kanala. Glavna prednost single cone tehnike je brže punjenje korijenskog kanala, pri čemu se u kombinaciji s cementom dobiva kompaktno, homogeno punjenje duž cijelog kanala (43). (Slika 4)

### Usporedba ručne i strojne instrumentacije korijenskih kanala

Ručna instrumentacija, kao i rotacijske tehnike imaju različite prednosti i ograničenja. Ručna instrumentacija često je financijski isplativija te pruža bolju taktičnu kontrolu, što je čini prikladnijom za obradu uskih i zakrivljenih korijenskih kanala. Nasuprot tome, zahtijeva više vremena, ima strmiju krivulju učenja te nosi veći rizik proceduralnih pogrešaka. Rotacijska

instrumentacija povećava učinkovitost i sigurnost postupka, omogućuje veću fleksibilnost instrumentata te bolju otpornost na ciklički zamor, a povezuje se i s višim stopama kliničkog uspjeha. Međutim, te prednosti najčešće dolaze uz višu početnu cijenu opreme i potrošnog materijala (44, 45).

### Faktori koji utječu na lom endodontskih instrumenata:

Sigurnost pri oblikovanju korijenskih kanala ključan je faktor koji se mora uzeti u obzir u kliničkoj praksi bez obzira na ostale prednosti strojnih sustava obrade korijenskih kanala. Brojni čimbenici povezani su s frakturom NiTi instrumenata, uključujući vještinu i iskustvo operatera, tehniku instrumentacije, dinamiku uporabe instrumenata, broj korištenja, anatomske karakteristike kanala, metalurgiju i broj ciklusa sterilizacije (46). Lom NiTi instrumenata uglavnom se javlja u dva slučaja; kao posljedica cikličkog zamora ili torzijskog opterećenja (14).

**Ciklički zamor** nastaje kada se instrument rotira unutar zakrivljenog kanala. Na točki zakrivljenja, vanjska površina instrumenta izložena je napetosti dok je unutarnja površina izložena kompresiji. Kako



Slika 4. Primjeri 'single cone' gutaperki (VDW RECIPROC®).

se instrument rotira, područja napetosti i kompresije se izmjenjuju, što dovodi do inicijalnih mikrofraktura i naposljetku loma (19).

**Torzijski lom** javlja se kada se vrh ili bilo koji drugi dio instrumenta zaključa u stijenci kanala, dok osovinica nastavlja rotirati zbog kontinuirane apikalne sile (14). Torzijsko opterećenje može se smanjiti ograničavanjem kontakta instrumenta sa stijenkama kanala; uporabom crown-down tehnike, osiguravanjem glide path-a do radne duljine i adekvatnom primjenom irigansa poput natrijevog hipoklorita (NaOCl) tijekom oblikovanja kanala (19).

Osim cikličkog zamora i torzijskog opterećenja, u literaturi postoji nesuglasje oko utjecaja **brzine rotacije** na incidenciju fraktura. Neki autori smatraju da brzina rotacije nema značajan utjecaj na pojavu fraktura (47), dok drugi nalaze suprotno (48). Proizvođači instrumenata obično preporučuju specifičan broj okretaja u minuti (rpm) za sigurno korištenje, najčešće između 250 i 600 rpm. Ključno je poštivanje uputa proizvođača i redovita inspekcija instrumenata (2).

**Vještina i iskustvo operatera te trajanje preparacije kanala.** Brojni autori potvrđuju da manje iskusni operatori češće uzrokuju deformacije i frakture NiTi instrumenata u odnosu na iskusne kolege. Budući da manje iskusni operatori u pravilu trebaju više vremena za instrumentaciju, povećava se broj rotacijskih ciklusa, čime raste rizik od frakture instrumenata. Dodatni čimbenici uključuju način rukovanja instrumentima te silu pritiska tijekom rada (2).

**Tehnika instrumentacije.** Tehnika *crown-down* (širenje koronarnog dijela kanala prije apikalne preparacije) dokazano smanjuje torzijsko naprezanje, osobito kod instrumenata manjeg promjera. Osnovni korak u preparaciji kanala za smanjenje učestalosti fraktura instrumenata je koronarno širenje kanala Gates-Glidden svrdlima ili specifičnim rotacijskim instrumentima (npr. ProFile ISO Orifice Shapers, Dentsply Sirona) te uspostava *glide path-a* ručnim instrumentima (46). Time se omogućuje sigurniji rad rotacijskim instrumentima i sprječavaju komplikacije poput začepjenja ili ekstruzije debrisa, stvaranja stepenice i frakture instrumenata (2).

**Geometrija kanala.** Što je anatomija korijenskog kanala složenija, to je veći rizik od torzijskog loma. Stoga je od iznimne važnosti provesti pre-

ciznu radiološku dijagnostiku koja prema potrebi može uključivati CBCT analizu (46). Iqbal i suradnici zaključili su da je vjerojatnost loma instrumenta u apikalnoj trećini trideset tri puta veća nego u koronalnoj trećini i šest puta veća nego u srednjoj trećini korijena (49). Ovo je klinički značajno jer što je veći stupanj savijanja kojem je rotacijski NiTi instrument izložen prilikom uporabe u zakrivljenim kanalima, to je kraći njegov vijek trajanja. Lom instrumenata bio je značajno učestaliji (do 3 puta) u kutnjacima nego u pretkutnjacima. Vjerojatnost loma instrumenta u meziobukalnom kanalu gornjeg kutnjaka bila je tri puta veća nego u distobukalnom kanalu te u meziobukalnom kanalu donjeg kutnjaka (koji su poznati po većoj zakrivljenosti) nego u meziolingvalnom kanalu (46).

**Sterilizacija.** Sterilizacija i dezinfekcija dovode do promjena u fizikalnim i mehaničkim svojstvima instrumenata, no zaključci o tome jesu li ti učinci klinički povoljni ili nepovoljni nisu ujednačeni među različitim studijama. Neki autori tvrde da sterilizacija ne utječe značajno na učestalost fraktura, dok drugi bilježe povećanu otpornost, što se vjerojatno može pripisati novim legurama obrađenim toplinskim postupcima (2). Općenito dolazi do smanjenja sposobnosti rezanja nakon autoklaviranja, a ta promjena postaje statistički značajna nakon pet ciklusa sterilizacije. Korozivni učinak opaža se nakon primjene dezinfekcijskih sredstava na bazi natrijevog hipoklorita (u trajanju od 12 do 48 sati) te nakon primjene toplinske sterilizacije. Međutim, svi autori se ne slažu oko ovih nalaza te se temperature potrebne za postizanje pozitivnih svojstava u praksi se uglavnom ne postižu (46,50). Ponovna upotreba recipročnih instrumenata još uvijek je predmet rasprave. Preporuka većine proizvođača NiTi instrumenata je da se isti ne steriliziraju, čime se osigurava dodatna sigurnost u prevenciji frakture instrumenta (51).

**Broj uporaba.** Proizvođači preporučuju jednokratnu upotrebu NiTi instrumenata. Međutim, znanstvena literatura ne donosi jednoznačne smjernice. Neka istraživanja upućuju da je način uporabe važniji čimbenik od samog broja korištenja. Neovisno o načinu korištenja, višekratna upotreba smanjuje otpornost instrumenata te povećava ciklički zamor.

Također, povećanjem broja upotreba povećava se i potreban moment sile (torzija) za savijanje i rad (2).

**Irigansi.** Utvrđeno je da natrijev hipoklorit (NaOCl), često korišten kao irigacijsko sredstvo, može imati negativan utjecaj na mehanička svojstva NiTi instrumenata zbog korozivnog djelovanja (2). Rezultati su pokazali da su stope korozije ProTaper Universal rotirajućih instrumenata bile najviše u otopini 5 % natrijevog hipoklorita (NaOCl) ( $p < 0,001$ ). Veće stope korozije zabilježene su u otopini 15 % EDTA u usporedbi s otopinama 2,5 % NaOCl i 2 % CHX ( $p < 0,001$ ). Najniža stopa korozije utvrđena je u otopini 2 % CHX (52).

### Zaključak

Strojna instrumentacija NiTi instrumentima predstavlja jednu od najvažnijih revolucija u modernoj endodonciji, omogućujući brzu, predvidivu i učinkovitu obradu korijenskih kanala uz istovremeno očuvanje njihove prirodne anatomije. Iako nove generacije instrumenata, uključujući toplinski obrađene legure i inovativne sustave gibanja (rotacijski, recipročni,

adaptivni), znatno smanjuju proceduralne pogreške i poboljšavaju rezultate liječenja, njihova optimalna primjena zahtijeva sinergiju s ručnom instrumentacijom – osobito u pripremi glide path-a. Uz brojne prednosti, strojna instrumentacija korijenskih kanala suočava se s nizom izazova. Među glavnim problemima su nedostatak standardizacije među proizvođačima, ograničeni klinički dokazi o superiornosti pojedinih sustava, veća učestalost frakture instrumenata u odnosu na ručne metode, nemogućnost učinkovite sterilizacije nekih instrumenata, kao i visoki troškovi zahvata. Za postizanje optimalne učinkovitosti i sigurnosti preporučuje se pažljivo odabrati sustav prema anatomiji kanala i vlastitom iskustvu te sinergističku primjenu ručnih i strojnih endodontskih instrumenata, posebno za osiguravanje *glide patha*. Uz to, potrebno je izbjegavati višekratnu uporabu instrumenata, poštovati preporučene protokole irigacije te slijediti upute proizvođača za primjenu odabranog sustava. U konačnici, temelj uspješne endodontske terapije ostaje kombinacija tehnika, kliničkog znanja i individualiziranog pristupa svakom slučaju.

### Reference

1. Mustafa M, Attur K, Bagda KK, Singh S, Oak A, Kathiria N. An Appraisal on Newer Endodontic File Systems: A Narrative Review. *J Contemp Dent Pract.* 01. rujna 2022.; 23(9):944–52.
2. Dablanca-Blanco AB, Castelo-Baz P, Miguéns-Vila R, Álvarez-Novoa P, Martín-Biedma B. Endodontic Rotary Files, What Should an Endodontist Know? *Medicina (Kaunas).* 27. svibanj 2022.; 58(6):719.
3. Gavini G, Santos MD, Caldeira CL, Machado ME de L, Freire LG, Iglecias EF, i sur. Nickel-titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. *Braz Oral Res.* 18. listopada 2018.; 32.
4. Shubhashini N, Sahu GK, Consul S, Nandakishore K, Idris M. Rotary Endodontics or Reciprocating Endodontics: Which is New and Which is True? *Journal of Health Sciences & Research.* prosinac 2016.; 7(2):51–7.
5. Auricchio F, Taylor RL, Lubliner J. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* 15. srpanj 1997.; 146(3):281–312.
6. Andreasen GF, Hilleman TB. An Evaluation of 55 Cobalt Substituted Nitinol Wire for Use in Orthodontics. *The Journal of the American Dental Association.* 01. lipanj 1971.; 82(6):1373–5.
7. Civjan S, Huget EF, DeSimon LB. Potential Applications of Certain Nickel-Titanium (Nitinol) Alloys. *J Dent Res.* 01. siječanj 1975.; 54(1):89–96.
8. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod.* srpanj 1988.; 14(7):346–51.
9. Pereira ÉSJ, Viana ACD, Buono VTL, Peters OA, Bahia MG de A. Behavior of nickel-titanium instruments manufactured with different thermal treatments. *J Endod.* siječanj 2015.; 41(1):67–71.
10. Logsdon J, Dunlap C, Arias A, Scott R, Peters OA. Current Trends in Use and Reuse of Nickel-Titanium Engine-driven Instruments: A Survey of Endodontists in the United States. *J Endod.* ožujak 2020.; 46(3):391–6.
11. Peters OA, Morgental RD, Schulze KA, Paqué F, Kopper PMP, Vier-Pelisser FV. Determining cutting efficiency of nickel-titanium coronal flaring instruments used in lateral action. *Int Endod J.* lipanj 2014.; 47(6):505–13.
12. Arias A, Peters OA. Present status and future directions: Canal shaping. *Int Endod J.* svibanj 2022.; Suppl 3:637–55.
13. Zupanc J, Vahdat-Pajouh N, Schäfer E. New thermomechanically treated NiTi alloys – a review. *Int Endod J.* listopad 2018.; 51(10):1088–103.
14. Liang Y, Yue L. Evolution and development: engine-driven endodontic rotary nickel-titanium instruments. *Int J Oral Sci.* 18. veljača 2022.; 14:12.

15. McKelvey A, Ritchie R. Fatigue-crack growth behavior in the superelastic and shape memory alloy Nitinol. *Metall Mater Trans A*. 2001; 32(3):731–43. doi: 10.1007/s11661-001-1008-7.
16. Thompson SA. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J*. srpanj 2000.; 33(4):297–310.
17. Shen Y, Zhou H min, Zheng Y feng, Peng B, Haapasalo M. Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. *J Endod*. veljača 2013.; 39(2):163–72.
18. Glassman G. TF Adaptive: a novel approach to nickel-titanium instrumentation – „Rotary when you want it, Reciprocation when you need it“. *Endodontic Practice US*. 2014; 7(3):22–6.
19. Torabinejad M, Fouad AF, Shabahang S. *Endodontics: principles and practice*. Sixth edition. London: Elsevier; 2021. 496 str.
20. Patiño PV, Biedma BM, Liébana CR, Cantatore G, Bahillo JG. The influence of a manual glide path on the separation rate of NiTi rotary instruments. *J Endod*. veljača 2005.; 31(2):114–6.
21. Bardsley S, Peters CI, Peters OA. The effect of three rotational speed settings on torque and apical force with vortex rotary instruments in vitro. *J Endod*. lipanj 2011.; 37(6):860–4.
22. Hargreaves KM, Berman LH, Rotstein I, Cohen S, urednici. *Cohen's pathways of the pulp*. Twelfth edition. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2021.
23. Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG. The „balanced force“ concept for instrumentation of curved canals. *J Endod*. 1985; 11(5):203–211.
24. De-Deus G, Moreira EJ, Lopes HP, Elias CN. Extended cyclic fatigue life of F2 ProTaper instruments used in reciprocating movement. *Int Endod J* 2010 Dec; 43(12):1063–1068.
25. Gambarini G, Rubini A, Al Sudani D, Gergi R, Culla A, De Angelis F, Di Carlo S, Pompa G, Osta N, Testarelli L. Influence of different angles of reciprocation on the cyclic fatigue of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 2012 Oct; 38(10):1408–1411.).
26. Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G. Cyclic fatigue of Reciproc and WaveOne reciprocating instruments. *Int Endod J* 2012 Jul; 45(7):614–618.
27. Varela-Patiño P, Martin Biedma B, Rodriguez N, Cantatore G, Malentaca A, Ruiz-Pinon M. Fracture rate of nickel-titanium instruments using continuous versus alternating rotation. *Endod Pract Today* 2008 Fall; 2(3):193–197.
28. Bürklein S, Schäfer E. Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems. *J Endod* 2012 Jun; 38(6):850–852.
29. Machado MEL, Nabeshima CK, Leonardo MFP, Reis FAS, Britto MLB, Cai S. Influence of reciprocating single-file and rotary instrumentation on bacterial reduction on infected root canals. *Int Endod J* 2013 Nov; 46(11):1083–1087.
30. Giuliani V, Di Nasso L, Pace R, Pagavino G. Shaping ability of WaveOne primary reciprocating files and ProTaper system used in continuous and reciprocating motion. *J Endod* 2014 Sep; 40(9):1468–1471.
31. Silva EJ, Orłowsky NB, Herrera DR, Machado R, Krebs RL, Coutinho-Filho Tde S. Effectiveness of rotatory and reciprocating movements in root canal filling material removal. *Braz Oral Res* 2015; 29(1):1–6.
32. Nouri H, Amini K, Jahromi MZ. Comparison of full rotation and reciprocating movements in regaining apical patency during endodontic retreatment. *Dent Res J (Isfahan)*. 21. listopad 2021.; 18:85.
33. Çapar ID, Arslan H. A review of instrumentation kinematics of engine-driven nickel–titanium instruments. *International Endodontic Journal*. 2016.; 49(2):119–35.
34. Kasumović I. Inovativni pristupi u endodontskoj terapiji zuba [Internet]. University of Zagreb. School of Dental Medicine. Department of Endodontics and Restorative Dentistry; 2019 [citirano 20. travanj 2025.]. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:127:019101>
35. Kuzekanani M. Nickel-Titanium Rotary Instruments: Development of the Single-File Systems. *J Int Soc Prev Community Dent*. 2018.; 8(5):386–90.
36. Paritosh S. Entering A New Era in Endodontics with Revolutionary Single File Systems: A Comprehensive Review.
37. Kim HC, Sung SY, Ha JH, Solomonov M, Lee JM, Lee CJ, i sur. Stress generation during self-adjusting file movement: minimally invasive instrumentation. *J Endod*. prosinac 2013.; 39(12):1572–5.
38. Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z. Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the self-adjusting file. *J Endod*. veljača 2012.; 38(2):232–5.
39. Hin ES, Wu MK, Wesselink PR, Shemesh H. Effects of self-adjusting file, Mtwo, and ProTaper on the root canal wall. *J Endod*. veljača 2013.; 39(2):262–4.
40. Misgar BA, Goyal V, Goyal P, et al. Endodontic File Systems with Special Emphasis on Self-adjusting Files: A Comprehensive Review. *J Oper Dent Endod* 2021; 6(1):14–23.
41. Kumar S, Gade V. Single file Niti-rotary systems. *Int J Med Dent Sci*. 2015; 4(1):701. doi: 10.19056/ijmdsjssmes/2015/v4i1/79965.
42. Jukić Krmek S, Klarić E, Marović D, Matijević J, Baraba A. *Pretklinička endodoncija*. Zagreb: Medicinska naklada; 2017. 160 str.
43. Pereira, Andréa & Nishiyama, Celso & Pintro, L.D.C.. (2012). Single-cone obturation technique: A literature review. *Rev Sul-Bras Odontol*. 9. 442–447. 10.21726/rsbo.v9i4.1026.



44. Makanjuola J, Umesi D, Oderinu O. Treatment outcome of manual versus rotary techniques in single-visit endodontics for patients in a Nigerian teaching hospital: A randomized clinical trial. *J West Afr Coll Surg.* 2018.; 8(2):44–75.
45. Singhal DH. Manual vs Rotary Endodontics: A Comprehensive Comparison for Successful Root Canal Treatment [Internet]. *Dentalkart.* 2023 [citirano 07. svibanj 2025.]. Dostupno na: <https://blogs.dentalkart.com/manual-vs-rotary-endodontics-a-comprehensive-comparison-for-successful-root-canal-treatment/>
46. McGuigan MB, Louca C, Duncan HF. Endodontic instrument fracture: causes and prevention. *Br Dent J.* travanj 2013.; 214(7):341–8.
47. Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Influence of rotational speed, torque and operator's proficiency on ProFile failures. *Int Endod J.* 2002; 35(9):712–8.
48. Martin B, Paqué F, Peters OA. Root canal preparation with Reciproc: a novel single-file rotary system. *Int Endod J.* 2003; 36(4):262–6.
49. Iqbal MK, Meetu R, Kohli, Kim J S. A retrospective clinical study of incidence of root canal instrument separation in an endodontics graduate programme: a PennEndo database study. *J Endod* 2006; 32: 1048–1052.
50. Dioguardi M, Arena C, Sovereto D, Aiuto R, Laino L, Illuzzi G, i sur. Influence of sterilization procedures on the physical and mechanical properties of rotating endodontic instruments: a systematic review and network meta-analysis. *Front Biosci (Landmark Ed).* 30. prosinac 2021.; 26(12):1697–713.
51. AlRahabi M, Atta K. Effect of sterilization on nickel-titanium rotary and reciprocating instruments: a review. *Clin Cosmet Investig Dent.* 2019; 11:1–11.
52. Özcan T, Sonat B, Öztan MD, Basmaci F, Aksoy U. The Determination of the Corrosion Rates of Rotary Ni-Ti Instruments in Various Irrigation Solutions. *Cyprus J Med Sci.* 2023 Apr; 8(2):136–141. doi:10.4274/cjms.2021.2475.