

FREKANS REFERANSLARI: ELEKTRONİĞİN TEMELİNDEKİ MEKANİK HASSASİYET

B. Erdem Alaca

Doç. Dr.,

Koç Üniversitesi,

Mühendislik Fakültesi,

Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ealaca@ku.edu.tr

ÖZET

Zaman tutan ve frekans referansı olarak görev yapan salıngaçlar, bütün elektronik sistemlerde ve özellikle telsiz haberleşme alanında ihtiyaç duyulan bileşelerin başında gelmektedir. Bu cihazların mekanik sarkaçlarla başlayan tarihsel gelişimi, kuvars ve diğer piezoelektrik kristallerden sonra VHF ve UHF bantlarında çalışan çınlaçları içeren mikroeletromekanik sistemlere doğru evrilmiştir. 10 GHz üzerinde frekans ihtiyacı için, çınlaç boyutlarının küçülmesiyle beraber nanotel ya da nanotüp yapıları çınlaçların ticari kullanımının ortaya çıkması öngörülmektedir. Aynı zamanda, bu tür salıngaçların frekans ayarının yapılabilmesi, yani akort, hem çevresel etkilerin telafisi hem de sahada programlanabilen salıngaçların geniş uygulama alanı bulması sebebiyle bir gereklilik arz etmektedir ve küçülen boyutlarla beraber yeni teknolojilere ihtiyaç duymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Salıngaç (osilatör), çınlaç (rezonatör), kuvars, RF MEMS, NEMS

FREQUENCY REFERENCES: MECHANICAL PRECISION IN THE FOUNDATIONS OF ELECTRONICS

ABSTRACT

Oscillators serving as timekeepers and frequency references are one of the most common elements in all electronic systems and especially in wireless communication. Starting with the mechanical pendulum evolution of these devices paved the way to quartz and other piezoelectric crystal-based oscillators and finally to microelectromechanical systems operating in VHF and UHF bands. It is predicted that frequency needs beyond 10 GHz will be met through further miniaturization of resonator dimensions with the prospect of commercial use of nanowire or nanotube resonators. Adjustment of the operation frequency of oscillators, i.e. tuning, is a requirement due to the compensation needs against environmental factors and also due to the wide range of applications of field-programmable oscillators. With shrinking resonator size tuning as well necessitates introduction of new technologies.

Keywords: Oscillator, resonator, quartz, RF MEMS, NEMS

Geliş tarihi : 25.06.2013

Kabul tarihi : 21.10.2013

Alaca, B. E. 2013. "Frekans Referansları: Elektronikğin Temelindeki Mekanik Hassasiyet," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 647, s. 53-70.

1. GİRİŞ

Kolumuzda gündelik ihtiyacımızın çok ötesinde bir hassasiyete sahip saatlerle doluyoruz. Bu saatlerin çoğu olimpiik yarışlarda ya da laboratuvarlarda zaman tutma amacıyla kullanılmaz. Eğer saate bakmanıza degecek kadar dakik işleyen bir toplu taşıma sisteminden faydalanıyorsanız, en düşük zaman birimi olarak büyük ihtimalle, bir dakika sizin için bir şey ifade edecektir. Üstelik ihtiyacınız üzerindeki bu hassasiyeti, bir yüzyıl önce hayal bile edilemeyecek kadar ucuza edinebiliyorsunuz. Ayrıca günler, aylar ve hatta yıllar içinde zaman ölçerinizin tuttuğu zamanın kaymaması ve onu devamlı düzeltmek zorunda kalmamanız da cabası... Bir yandan kol saatleri, telefon ve bilgisayar ekranları modern bir *memento mori* olarak bize daima geçen zamanı hatırlatırken, kullandığımız tüm elektronik sistemlerin ve haberleşme teknolojilerinin çalışması da saat benzeri zamanı tutan frekans referanslarına bağlı olarak gerçekleşir. Örneğin cebimizdeki telefonlarda bunun benzeri birkaç adet frekans referansı aynı anda çalışır. Zaman biriminin ölçümü için gerekli bu frekans referanslarının evrimi, günde 3 saniye kayabilen, elle kurulan saat mekanizmalarından günümüzde 138 milyon yılda 1 saniyeden daha az kayan atomik saatlere doğru gerçekleşmiştir [1]. İşte tüm bu saatlerin ve frekans referanslarının temelinde bir salıngaç (osilatör), yani sabit bir frekansta ya da frekans aralığında salınım yapan bir sistem yatar ve makina mühendisleri açısından ilginç olan, bu salıngaçların günlük kullanım esnasında en yüksek performans gösterenlerinin daima mekanik bir çınlaç (rezonatör) kullanan salıngaçlar olmasıdır.

Günlük uygulamalarda kullanılan frekans referansları, ihtiyaç alanına göre, silisyum saat olarak bilinen tümleşik devre salıngaçlarından, tamamen mekanik çınlanıma (rezonans) dayalı çalışan bir taraftan mikro elektromekanik sistem (MEMS) salıngaçlarına ve diğer taraftan kuvars kristal ile benzeri piezoelektrik kristal salıngaçlarına uzanan geniş bir yelpazeye yayılırlar. Bu salıngaçlar, çınlanımıyla beraber gelen mekanik keskinlik sayesinde günümüz teknolojisinin temelini oluşturan yapıtaşlarıdır ve sağladıkları frekans referansı sayesinde zaman tutma ve bunun sonucunda her türlü tüketici, endüstriyel ve askeri elektronik ürünün çalışması gerçekleştirilir.

Bahsi geçen frekans referanslarının hassasiyeti ve kararlılığı, söz konusu elektronik sistemin performansı üzerinde son derece etkilidir. Telsiz haberleşme teknolojisi, bunun en göze çarpan örneklerinden birini oluşturmaktadır. Bu tür frekans referansları, 3G/4G cep, GPS, WiFi, WiMAX ve Bluetooth gibi telsiz haberleşme uygulamalarındaki en önemli safhayı oluştururlar. Örneğin GSM'in erken dönemlerinde her bir taşınabilir telefon, dört adet piezoelektrik frekans kontrol bileşeni içermekte idi: i) RF SAW filtresi (900 MHz – 2 GHz arası, lityum tantalat ya da lityum niobat), ii) IF SAW filtresi

(50 MHz – 400 MHz arası, kuvars), iii) sıcaklık telafili kristal salıngaç (13/26 MHz, kuvars), ve iv) ses çatalı (modern saatlerde de kullanılmakta olan saniyede 2^{15} döngülük zaman ayarını gerçekleştirir, 32.768 kHz, kuvars). Daha sonra hem IF SAW filtresinin, doğrudan çevrim teknolojisinin tatbikatı sonucu kullanım dışı kalması hem de sıcaklık telafili salıngaçın, yonga üzeri (on-chip) sayısal telafili kristal salıngaç devre ile yer değiştirmesi, toplam salıngaç sayısını azaltsa da yonga harici (off-chip) bir kuvars salıngaç her zaman gerekli olmuştur [2].

En kararlı frekans referansları olan atomik saatler ve fırın içi kristal salıngaçlar, taşınamayan ve bu yüzden mobil uygulamalar için uygun olamayan frekans referanslarıdır. Diğer yandan kuvars ve diğer piezoelektrik kristallere dayalı salıngaçlarla başlayan taşınabilir frekans referanslarının gelişimi, günümüzde MEMS tabanlı salıngaçlarla devam etmektedir. Kullanılan imalat tekniğinin mikroelektronik geleneğinden gelmesi sayesinde yonga üzeri yüksek yoğunluklu tümleştirme, küçülen boyut, düşen maliyetler ve düşük güç sarfiyatı ile 10.000'i aşan kalite faktörleri, 50.000 g mertebesinde şok dayanımı gibi performans kıstaslarına ulaşılmıştır. Bu tarihsel süreç içerisinde 10 GHz ötesi, taşınabilir salıngaçlar alanındaki gelişmenin, nanomekanik çınlaçların kullanımıyla beraber sürdürüleceği öngörülmektedir.

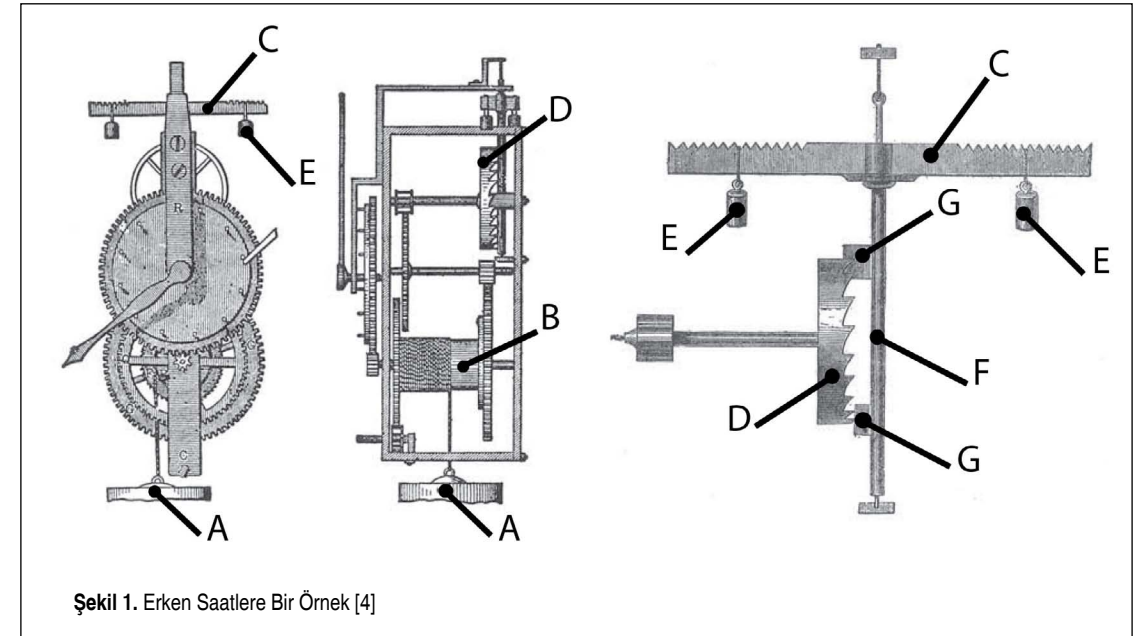
Frekans ayarı (akort) yapılabilen bir salıngaç, birçok bakımdan tercih edilir. Frekans ayarı, bazı durumlarda zorunluluk, bazı durumlarda ise faydalı bir ilave yetenek olarak ortaya çıkar. Örneğin imalat toleransları, paketleme esnasında oluşan gerilmeler, zaman içinde çınlaç malzemesinde oluşan yorulma ve sıcaklık değişimleri gibi kaçınılmaz etkiler, salıngacı hedeflenen frekansından uzaklaştırır. Frekans ayarı sayesinde bu tür harici etkilerin yaratacağı frekans kayması telafi edilebilmektedir. Diğer taraftan, tek bir salıngaç ile geniş bir bant aralığının taranabilmesi, uygulama açısından kolaylık yaratmaktadır. Sahada programlanabilen bu tür salıngaçlardan, çeşitli elektronik sistemler üzerinde gerçek zamanlı test ve performans optimizasyonu, hızlı sistem prototipleme ve geliştirme gibi alanlarda faydalanılmaktadır. Örneğin radyo bandında kanal seçimi gibi korunması gereken frekans hassasiyetinin arttığı (%0.01 bant genişliği) ileri uygulamalarda, frekans ayarının önemi de artar [3]. Ticari olarak tedarik edilebilen bu tür programlanabilir MEMS salıngaçları mevcuttur ve 1-200 MHz arası geniş bir bant aralığında çalışabilmektedirler.

Bu tarama çalışmasında öncelikle mekanik çınlaçların gelişim süreci incelendikten sonra elektronik ile tümleştirme prensipleri tartışılacaktır. Başlıca salıngaç sınıflarını oluşturan elektronik, kuvars ve diğer piezoelektrik kristal salıngaçlar ile MEMS tabanlı salıngaçlar, teknik karşılaştırmalar eşliğinde anlatılacaktır. Daha sonra her sınıf içerisinde mevcut akort teknolojileri tartışılarak sonuç değerlendirmesine geçilecektir.

2. MEKANİK ÇINLAÇLARIN TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1 Erken Örnekler

Klasik saat mekanizması üç bileşekeden oluşur: i) sabit bir frekansla salınan çınlaç, ii) çınlacın devir sayısını ölçen ve aynı zamanda çınlaca her devir sonunda hareketini devam ettirebilmesi için enerji aktaran maşa (escapement) ve iii) bir enerji kaynağı. Bu mekanizmaların ilk örnekleri Ortaçağ'da saat kulelerinde kullanılmıştır. İlk olarak kim tarafından ve nerede icat edildiği belli olmayan bu saatler, pirincin saatlerde kullanımını 1560'lara kadar geciktirdiği için demir ve alaşımlarından yapılmışlardır ve dolayısıyla zamana yenik düşmüşlerdir. Bu ilk demir saatlerin günümüze ulaşan örnekleri yoktur. Ancak Şekil 1'de gösterildiği gibi çizimler mevcuttur [4].



Şekil 1'de her üç saat bileşkesi de rahatlıkla görülmektedir. Asılı bir ağırlığı temsilen A ile işaretlenmiş olan parça, enerji kaynağı olarak görev görür. Saat kulesinin tepesine kol gücü ile yükseltildikten sonra gün içerisinde saat mekanizmasının müsaade ettiği bir hızla aşağıya inerken saat mekanizmasının çalışması için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. A parçasının bir ip ile bağlı olduğu B makarası, bir dişli sistemini döndürür. Bu dişli sistemi, çınlaç olarak görev yapan ve her iki ucuna birer ağırlık asılı C parçasına bir maşa (D) vasıtasıyla bağlıdır. Genelde bir ipek ip ile tavana asılı duran çınlaç (C), iki ucundaki ağırlıkların (E) arasındaki mesafe tarafından belirlenen bir frekansla salınarak, zaman ölçümü için gerekli referans frekansını sağlar. Maşa, A ağırlığı altında bütün dişli sisteminin mütemediyen dönmesini engeller. Dişli sisteminin dönmesi, salıngacın maşayı, salınım frekansı tarafından belirle-

nen sabit aralıklarla salıvermesiyle mümkün olmaktadır. Her seferinde sadece bir dişli salıverilen maşa için, İngilizce'de kaçmak anlamına gelen "escape" fiilinden türetilmiş "escapement" terimi kullanılır. Bu özel maşa biçimi literatürde "verge escapement" olarak anılır. Çınlaç için ise "foliot" terimi kullanılır. Dişli sistemi, bir ucundan bağlı olduğu maşa tarafından belli bir hızla çevrilirken, diğer ucundan da saat koluna (akrep) bağlıdır ve zamanı ölçer. Bu tip saatler, dakika ölçecek hassasiyete sahip olmadıklarından sadece tek kollu bir göstergeleri bulunurdu. Erken örneklerde, yarım tona yaklaşan kütlelere sahip ağırlıkların kullanıldığı ve bunların rahat hareket etmesine müsaade edecek boyutlarda büyük kulelerin inşa edildiği bilinmektedir [4].

Bu tür bir maşa ve çınlaç ikilisinin etkileşimine yakından bakacak olursak oldukça karmaşık bir dizi hareketle karşılaşırız.

Çınlacın maşa ile etkileşime girdiği, merkezi dikey eksen (F) boyunca çıkıntı oluşturan iki adet kulak (G) bulunur. Bu iki kulak arasında 100° kadar bir açılma mesafesi vardır ve kulakların dikey mesafeleri de etkileşime girdikleri maşanın çapına eşittir. Her seferinde kulaklardan bir tanesinin A ağırlığı tarafından sürülen maşanın bir dişlisi üzerinde kayması suretiyle çınlaca enerji aktarılmış olur. Bu sayede çınlaç bir yönde dönme hareketi yapar. Kulağın, maşanın dişini salıvermesi ile kurtulduğu anda, maşanın eksenini serbest bir şekilde belli bir açı ile döner ve bu sayede A ağırlığı belli bir mesafe kadar alçalır. Bu serbest dönme hareketi, maşanın başka bir dişinin ikinci kulağa çarpmasıyla sona erer. Bu çarpma sonucu, salıngaç üzerinde negatif bir ivme meydana gelir ve salıngaç durur ve sonrasında ters yönde dönmeye başlar. F ekseninin 100° kadar dönmesiyle maşanın ilgili dişli, bu kulaktan da kurtulur

ve A ağırlığı tekrar bir miktar serbest düşme yapar. Bir önceki kulağın tekrar maşanın bir başka dişi ile etkileşime girmesiyle süreç başa dönmüş olur ve A ağırlığı yere ulaşana kadar bu hareketler silsilesi devam eder. Bundan sonra taşın yeniden kulenin tepesine kaldırılarak saatin kurulması gereklidir.

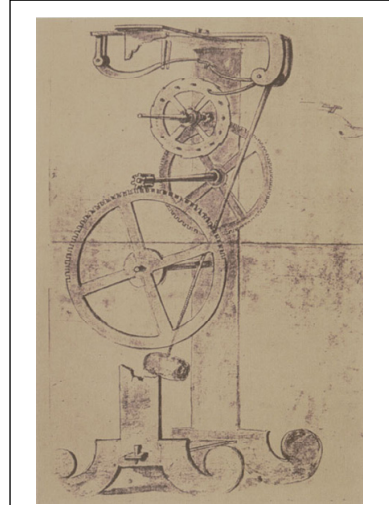
1400'lerden itibaren bu tür çınlaçlar, tekerlek şeklinde bir metal halka ile yer değiştirdi ve 1650'lere gelindiğinde tamamen ortadan kalktı. Yeni çınlaç görevi gören metal halka, modern saatlerde denge çarkı halini almıştır. 1500'lerden itibaren ise mekanizmayı çalıştıran ağırlık yerine şerit şeklinde bir çelik yay (zemberek) kullanılmaya başlanır. Bu sistemlerde, zemberek ilk kurulduğu zamanki mekanizma hızı ile gevşedikçe ortaya çıkan mekanizma hızı arasında büyük fark vardı. Bu sebeple bu yayların ilk örnekleri sabit bir güç kaynağı olarak, ağırlık tarafından sürülen mekanizmalara göre daha zayıf bir performans gösterdiler [4].

2.2 Sarkaç

Aristo mekaniğinde hiç geçmeyen sarkaç, 14. yy'ın ikinci yarısından itibaren teorik mekanik literatüründe işlenmeye başlar ve erken modern bilimin zor problemlerinden birisi haline gelir [5]. Bu gelişme, akademik çevrelerin iç dinamiklerinden ziyade, günün teknolojisinin zorlamasıyla ortaya çıkmıştır. Erken modern bilimcilerin birçoğu sarkaç problemi ile ilgilenmişler ve bunu kendi mekanik kuramları çerçevesinde açıklamaya çalışmışlardır. Bunların arasında bazıları Galileo'nun çağdaşı, bazıları ise ondan evvel yaşamış olan Jeremiah Horrocks, Niccolo Cabeo, Marin Mersenne, Marci von Kronland, René Descartes, Giovanni Battista Baliani ve Isaac Beeckman sayılabilir [5]. Galileo (1564-1642)'nin madde ve hareket ile ilgili temel kavramlarda köklü değişiklikler getiren mekanik kuramına ivmeyi ve dolayısıyla zamanı, sarkaç aracılığıyla soktuğu söylenebilir [6].

Galileo, öğrencisi Vincenzo Viviani'nin yazdığı biyografisi vesilesiyle sarkacın saatte kullanımını ilk öneren kişi olarak bilinmektedir. Vincenzo Viviani, öğretmeni hakkında doğruluğu kuşku götürmeyen birçok efsanevi olayı –örneğin Piza katedralinde tavana asılmış lambaların hareketine bakarak sarkacın eşzamanlılığını (isochronous, frekansın salınım genliğinden bağımsızlığı) düşünmesi- anlatmış olsa da zaman ölçümü konusunda sarkaç kullanan ilk örnek sayılan ve nabız ölçmek amacıyla 1603 senesinde önerilen pulsilogium isimli alete Galileo'nun katkısının olması muhtemel sayılmaktadır [5, 7]. Galileo'nun çalışmalarında sarkaç, 1588'de ilk kez ortaya çıkar [8]. Sarkacın frekans referansı olarak kullanıldığı ilk saat fikri de Galileo tarafından Vincenzo Viviani'ye göre 1637 senesinde ifade edilmiştir. Yine Vincenzo Viviani'nin notlarında 1659 tarihli ve sarkaç ile bir maşa içeren bir çizim bulunmaktadır (bkz. Şekil 2). Bu saatin Galileo'nun oğlu Vincenzio tarafından yapılan bir maketinin bulunduğu ve bunu takiben

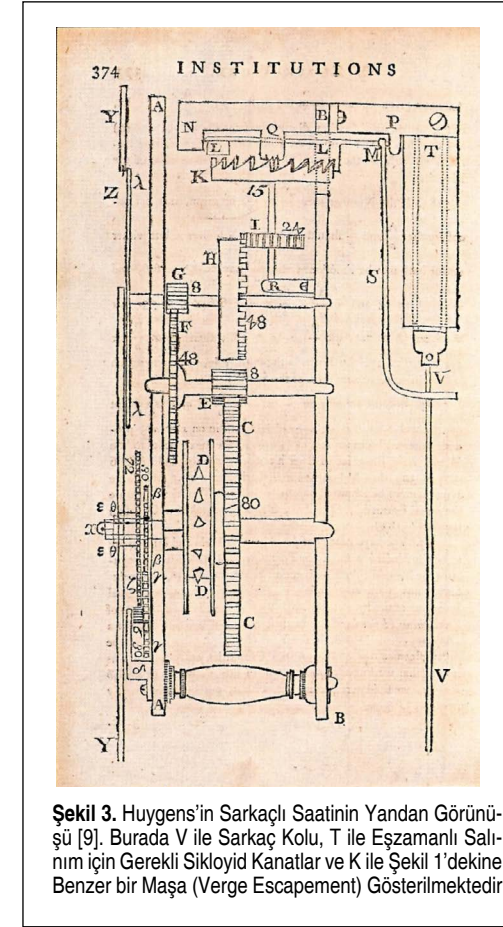
Floransa'da bir kule saatinin yapımının Vincenzio'nun ölümlüyle yarım kaldığı bilinmektedir [8].



Şekil 2. Galileo'nun Sarkaçlı Saat Fikrini Gösteren 1659 Tarihli Çizim [8]

Christiaan Huygens (1629-1695), Galileo'nun fikir babası sayıldığı fakat gerçekleştirmediği sarkaçlı saat fikrini ilk gerçekleştiren kişi oldu. Bu buluşun tarihi, Aralık 1656 olarak kabul edilir [8, 9]. Huygens, Haziran 1657'de saat ustası Salomon Coster ile beraber Hollanda'da saatin patentini aldı. Saat hakkındaki ilk yayını da bu sene içerisinde bir kitapçık şeklinde yaptı [9]. Bu saatin bir yan görünüşü Şekil 3'te gösterilmektedir. Burada sikloiyd kanatlar kullanılarak sarkacın eşzamanlı çalışması sağlanmıştır. Huygens, 1658'de, saatinin çalışma prensibini incelediği ve denizde boylam bulma konusunda uygun bir araç olarak önerdiği Horologium adlı eserini yayımlar. En önemli eseri kabul edilen ve 1673'te yayımlanan Horologium Oscillatorium'un ilk kısmı da bu saate ayrılmıştır. Huygens'in saati, o güne kadar yapılmış tüm saatlerden daha iyi çalışmış, gün başına dakikalarla tarif edilen ölçüm hassasiyeti, sarkacın zaman ölçümünde kullanımı sayesinde, günde 5 saniyenin altına inmiştir. Söz konusu hassasiyet, Robert Hooke tarafından 1657 senesinde bulunduğu iddia edilen ve sarkaçlı saatlere uygun bir maşanın (anchor escapement) –sarkaçlı saatlerle neredeyse eşzamanlı olarak- bulunmasıyla daha da pekiştirilmiştir [4].

17. yy'da zaman ölçümünde hassasiyet peşinde koşan çalışmaların ana motivasyonu, denizde boylam tayini olmuştur. Huygens de saatinin denizde boylam bulma problemini çözeceğini ummuştu. Enlem tayini, gök cisimlerinin ufuktan yüksekliğine bakarak yapılabilirken, boylam tayininde iki farklı yaklaşım denenmiştir. Bunlardan birincisi gök haritalarının kullanımına dayalıdır. Galileo'nun bile Jüpiter'in aylarının konumlarına göre boylam hesabı yapma konusunda çalışmaları olmuştur. İkinci yöntem ise yola çıkılan liman ile denizde bulunulan nokta arasındaki zaman farkının ölçülmesini – yani



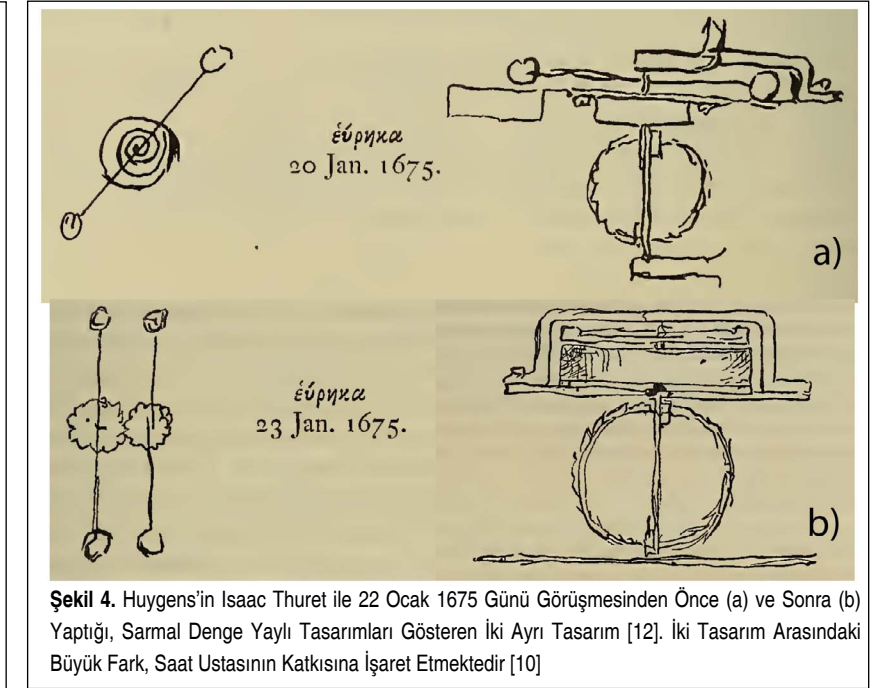
Şekil 3. Huygens'in Sarkaçlı Saatinin Yandan Görünüşü [9]. Burada V ile Sarkaç Kolu, T ile Eşzamanlı Salınım için Gerekli Sikloiyd Kanatlar ve K ile Şekil 1'dekine Benzer bir Maşa (Verge Escapement) Gösterilmektedir

yola çıkılan limandaki zamanı kaybetmeden tutabilecek bir saat kullanımını- önerir. Denizde bulunulan noktadaki öğle vakti (güneşin en tepede olduğu zaman) ve yola çıkılan noktadaki zaman bilirse, ikisi arasındaki fark, boylam farkına karşılık gelecektir.

Sarkaçlı saatin denizde istenilen hassasiyetle çalışmayacağı 1670'lerde belli olunca, sarkaç yerine alternatif frekans referansları aranmaya başlandı. Boylam sorunu o kadar büyük bir hâl almıştır ki sorunun çözümü için İngiltere'de bir kurul toplanmış ve 8 Temmuz 1714'te bir Boylam Yasası çıkartılarak belirlenen hassasiyetlerde ölçüm yapacak olanlara bir ödül vaat edilmiştir [8].

2.3 Sarmal Denge Yay

Huygens, kardeşi Constantijn ile beraber usta bir mercek taşıyıcısı idi. Cam işlemedeki ustalık, teleskoplar, mikroskoplar ve diğer optik aletlerin bilimsel önemi sebebiyle Huygens ve diğer bilimciler için önemli bir yetkinlik olmuştur. Ancak metal işleme konusuna aynı önem verilmezdi. Zira iki kardeş, hassas mercek imalatı yanında bu imalatı gerçekleştirecek makineler de tasarladılar ve bu tasarımlarının bir modelini yaptıktan sonra bir imalat atölyesine giderek metal işleme-



Şekil 4. Huygens'in Isaac Thuret ile 22 Ocak 1675 Günü Görüşmesinden Önce (a) ve Sonra (b) Yaptığı, Sarmal Denge Yaylı Tasarımları Gösteren İki Ayrı Tasarım [12]. İki Tasarım Arasındaki Büyük Fark, Saat Ustasının Katkısına İşaret Etmektedir [10]

cilere tasarımlarını hayata geçirtirlerdi. Ancak saat mekanizmaları söz konusu olduğunda gereken hassasiyet, Huygens'i hem tasarım aşamasında hem de model yapım aşamasında usta saatçilerle çalışmaya zorlamıştır. Nitekim Haziran 1657 tarihli sarkaçlı saatin Hollanda patentini Huygens tarafından lisanslandığı Laheyli Salomon Coster böyle bir saatçi idi [10]. Sarkacın açık denizdeki zor koşullar altında işe yaramadığını anlaşılmaması, Huygens'i alternatif frekans referansları aramaya itmiş ve 1675 senesinde Fransa'da sarmal denge yayının patentini almıştır. Bu ikinci patenti için de Parisli saat ustası Isaac Thuret ile yakın çalıştığı bilinmektedir [10]. Benzer şekilde sarkaçlı saatler hakkındaki birinci patent için yapılan ön çalışmaların, yine Isaac Thuret'in teknik desteği ile yürütülmüş olduğu iddia edilmektedir [11]. Huygens'in notlarında Isaac Thuret ile buluşmasından önce ve sonra çizdiği tasarımlar arasındaki büyük fark, tasarıma usta bir saatçinin elinin değiştiğine işaret etmektedir (bkz. Şekil 4) [12]. Sonrasında bu ikili, sarmal denge yayı kullanan patent üzerindeki haklar konusunda anlaşmazlığa düşerek uzun süren bir işbirliğini sona erdirirler.

Bir bilimci olarak Huygens'in, teknik ustalığı temsil eden Isaac Thuret ile bir araya geldiğinde yaşadığı bu sıkıntı, ileriki buluşları için kendisine çok önemli bir ders verdi. Denge yayının da denizde istenilen sonuçları vermemesi sonucu Huygens birçok farklı mekanizma denemeye devam etmiştir. Isaac Thuret'e, elinde karşı tarafın yorumuna açık, basit bir çizimle (Şekil 4a) giden Huygens, bu yeni buluşları için bir model geliştirmeden bir daha saatçilere gitmemeye ve bu sayede iletişim kopukluğuna mahal vermemeye özen göstermiştir [10].



Şekil 5. Sarmal Denge Yay ve Denge Çarkının 1820'lerden Kalma bir Kullanım Örneği [4]

Şekil 5'te 1820 civarı üretilmiş bir denge çarkı ile beraber bu tür bir sarmal denge yayı görülmektedir. Burada bir salınım esnasında sıkışan yay, elastik enerji depolayarak denge çarkının dönüş yönünü değiştirmesine yardımcı olur. Huygens'in orijinal patentinden sonra asırlar boyunca kullanılacak olan bu basit görünüşlü frekans referansı, zaman ölçümünün güvenilirliğini son derece arttırmıştır.

Huygens aynı zamanda İngiltere'de de Robert Hooke ile sarmal denge yayının fikri hakları konusunda anlaşmazlığa düştü [13]. Ancak denizde işleyen bir saati bulmak ikisine de nasip olmamış, Boylam Ödülü'nü sarmal denge yayının icadından neredeyse bir asır sonra kendi kendini yetiştirmiş bir saat ustası olan, çekirge maşasının mucidi John Harrison almıştır.

John Harrison'ın H4 adlı saati 1761-1762 senelerinde yapılan ve 147 gün süren İngiltere-Jamaika-İngiltere yolculuğunda iki dakikadan az bir zaman geri kalmıştır. 1764'te İngiltere-Barbados-İngiltere hattında yapılan ikinci deneme yolculuğunda geçen 156 gün içerisinde de saat bir dakikanın altında şaşar. Bu saatin bir yeni versiyonu, 1772 senesinde on hafta boyunca gözleminde denendiğinde günde saniyenin üçte biri ölçüsünde hassasiyet göstererek yapımıcısına 1773 senesinde Boylam Ödülü'nü kazandırmıştır [8].

2.4 Mikromekanik Salıngaçlar

Mekanik çınlaçların ve kuplaj elemanlarının kullanıldığı mekanik filtreler, 1940 ve 1950'lerde önemli bir aşama kaydetmiş, dar bant aralığı, düşük kayıp ve yüksek kararlılık gösteren cihazlar olarak elektronik endüstrisi için hayati bir öneme sahip olmuşlardır. Bu filtrelerin kullanım alanları öncelikle radyo ve telefon gibi iletişim sistemleri olmuştur. Özellikle telefonda ses filtrelemesi konusunda dünya standartlarını oluşturmuşlardır. Bunun yanı sıra seyrişer alıcıları, tren kontrol sistemleri gibi uygulamalarda ana seçici eleman olarak görev görmüşlerdir. Bunlara uzun mesafe üzerinden çalışan kontrol

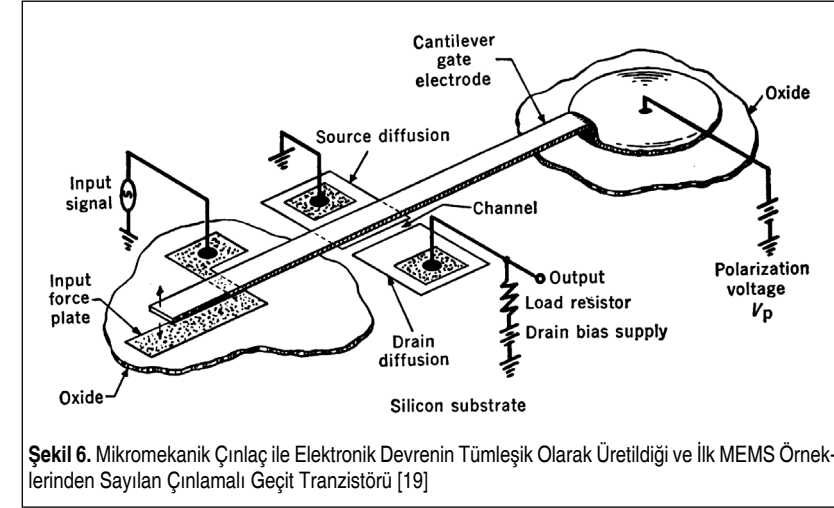
ve alarm sistemleri ile kol saatlerinin salıngaç devrelerinde kullanılmış olan ses çataları da dahil edilebilir [14]. Bu cihazların frekans sınırı, 1960'ların sonunda 50 kHz'e kadar dayanmıştır [15]. Çınlaç boyutlarının gittikçe küçülmesi ile frekanslar da artmış, 1980'lerin başında 1 MHz'e ulaşmıştır.

Bu tür yüksek frekans ile salınan bir mekanik elemanın elektronik devrelerde kullanımı uygun bir çevirici (transducer) gerektirir. Bu tür elektromekanik çeviriciler, elektriksel enerjiyi çınlaç tahrik ederek mekanik enerjiye çevirirler. Bunu takiben salınım yapan çınlaçın uğradığı yer değiştirmeler, bu sefer ters yönde –yani mekanikten elektrığe- çevrilerek filtreden elektriksel bir çıktı yaratılır. Bu sayede mekanik bileşke, elektronik devrenin bir parçası haline almış olur. Elektromekanik eşdeğerlik kullanılarak da bu mekanik bileşkelere tamamen elektriksel bileşke olarak kabul edilip salıngaç sisteminin geri kalan kısmı ile beraber ortak bir çerçeve içerisinde modellenenmektedir. Filtrenin çıktısını oluşturan sinyalin frekans davranışı, mekanik çınlaç veya kuplajlı çınlaçlar dizisi tarafından belirlenmiş olur.

Bu tür mekanik bileşkelere yapılarında kullanılan imalat teknolojilerinin değişimi ile beraber 1960'larda mikromekanik çınlaçlara dayalı salıngaç sistemleri önerilmeye başlandı. Bu yaklaşımın ana hedefi, çınlaç, elektronik devrenin geri kalanı ile beraber, aynı imalat süreci dahilinde (monolitik) üretilmek ve bu sayede güvenilirlik, boyut ve maliyet açısından oluşacak avantajlardan yararlanmak idi. Zira 1960'lara varıldığında gerek ses çataları gerek diğer eğilmeye bağlı çalışan mekanik çınlaçların boyutları alışlagelmiş imalat yöntemleriyle son yirmi beş sene içinde 100 kat kadar küçülmüş idi. Buna ilaveten mikro imalat yöntemlerinin kullanımıyla beraber üzerinde yeteri kadar çalışıldığı vakit herhangi bir cihazın üretilebileceği de artık belli olmuştu. Bu da en küçük çınlaçtan bir milyon kat daha düşük hacme sahip, yeni nesil çınlaçlar demektir [15].

Nitekim bu çınlaçların ilk örneği – belki de ilk mikro elektromekanik sistem (MEMS)- Westinghouse laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Huygens'in sarkaç ve denge yayı için saat ustalarına ihtiyaç duyması gibi bu ilk mikromekanik çınlaç için de doktoralı bir bilim adamı olan Harvey Nathanson ile teknisyen Robert A. Wickstrom arasında bir işbirliği gerekli olmuştur. Bilim adamının hayal ettiği şeyi teknik adam hayata geçirir. Ancak aradan geçen üç asır, oyunun kurallarını netleştirmiştir. Huygens ile Isaac Thuret arasında yaşanan gerginliklerin aksine gerek 1965'te yapılan ilk Applied Physics Letters yayınında [16] gerek 1968'de çıkan ilk Amerikan patentinde [17] her iki araştırmacının da adı geçer.

Burada bahsi geçen çınlaç, ankastre giriş şeklinde metal bir çubuktur. İlk örneklerde takriben 25 µm çapında ve 250 µm uzunluğunda tungsten bir çubuk kullanılmış ve 2.25 kHz mertebesinde bir frekans elde edilmiştir. Bu son derece ufak çınlaçın elektronik devre üzerinde yerine yerleştirilmesi mik-



Şekil 6. Mikromekanik Çınlaç ile Elektronik Devrenin Tümlüşük Olarak Üretildiği ve İlk MEMS Örneklerinden Sayılan Çınlamalı Geçit Tranzistörü [19]

roskop altında elle yapılmış ve lehimleme yoluyla yine elle sabitlenmiştir [18]. Sonrasında fotolitografi ile belirlenen kalıpların elektrokimyasal yöntemlerle kaplanması ile altın çınlaçlar kullanılmış, bu sayede elle tek tek yerleştirme problemi ortadan kalkarak seri imalata uygun bir teknik geliştirilmiştir [19]. İlginçtir ki günümüzde aynı montaj problemlerini bir milyar kat daha düşük hacimli nano ölçekli yapıtaşlarının mikro cihazlarla tümlüştürülmesi konusunda yaşıyoruz [20].

Bu ilk MEMS örneği sayılabilecek ve çınlamalı geçit tranzistörü adı verilen sistem, Şekil 6'da görülebilir. Cihaz üç ana parçadan oluşmaktadır. Birinci parça, konsol giriş şeklinde havada asılı duran ve arkasından doğru akım kutuplama potansiyeline bağlı olan çınlaçın kendisidir. Bu çınlaç, uç tarafının altına yerleştirilmiş ve silisyum alttaştan ince bir oksit tabakası ile ayrılmış, AC potansiyeli uygulanan bir eyleyici elektrot tarafından elektrostatik tahrik vasıtasıyla sürülmektedir. Yine çınlaçın altında ve bu sefer ortasına denk gelecek şekilde yerleştirilmiş, alan etkili tranzistör yapısı ise sistemin çıktısını oluşturur. Bu tranzistör, alttaşın geri kalanına göre ters katkılı iki adet yarıiletken alandan oluşur. Bu iki alan arasında kalan kanalın elektriksel iletkenliği, üzerinde etkili olan elektriksel alan ile değişir. İşte bu alan değişikliğini mekanik çınlaçın yüzeye yaklaşıp uzaklaşması sağlamaktadır. Çınlaçın alttaş ile arasındaki mesafesini değiştirmesini sağlayan bu hareket, sadece çınlanıma girildiği zaman ölçülebilecek kadar büyük bir mertebeye ulaşır. Bu sayede tranzistör, çınlaçın hareketlerini algılayan bir bileşke haline gelir. Çınlanım frekansı dışında başka frekansları algılamayarak bir frekans filtresi olarak çalışır. Elektronik ile tümlüştürme konusu bir sonraki bölümde daha detaylı olarak işlenecektir.

3. ELEKTRONİK İLE TÜMLEŞTİRME

3.1 İlk Elektrikli Saat

Zaman tutan sistemlerin temelinde bir çınlaç olduğunu gör-

dük. Başarılı bir zaman ölçümü için bu çınlaçın kararlı bir frekans referansı olması son derece önemlidir. Bunun için yapının rijitliğini değiştirecek her türlü malzeme ile ilgili etken ve sıcaklık, basınç gibi civar etkenleri göz önüne alınır. Örneğin ses çatalarında kullanılmak üzere elinvar gibi sıcaklık değişikliklerine nispeten duyarız özel alaşımlar geliştirilmiştir. Başarılı ölçüm için bu ilk kıstas kadar önemli ikinci bir kıstas da mevcut her türlü sürtünme ve diğer kayıp mekanizmalarına karşı çınlaçta enerji sağlayarak salınımını devam ettirmesini mümkün kılan bir tahrik mekanizmasıdır ki mekanik saatlerde bu işlevi maşanın yerine getirdiğini gördük.

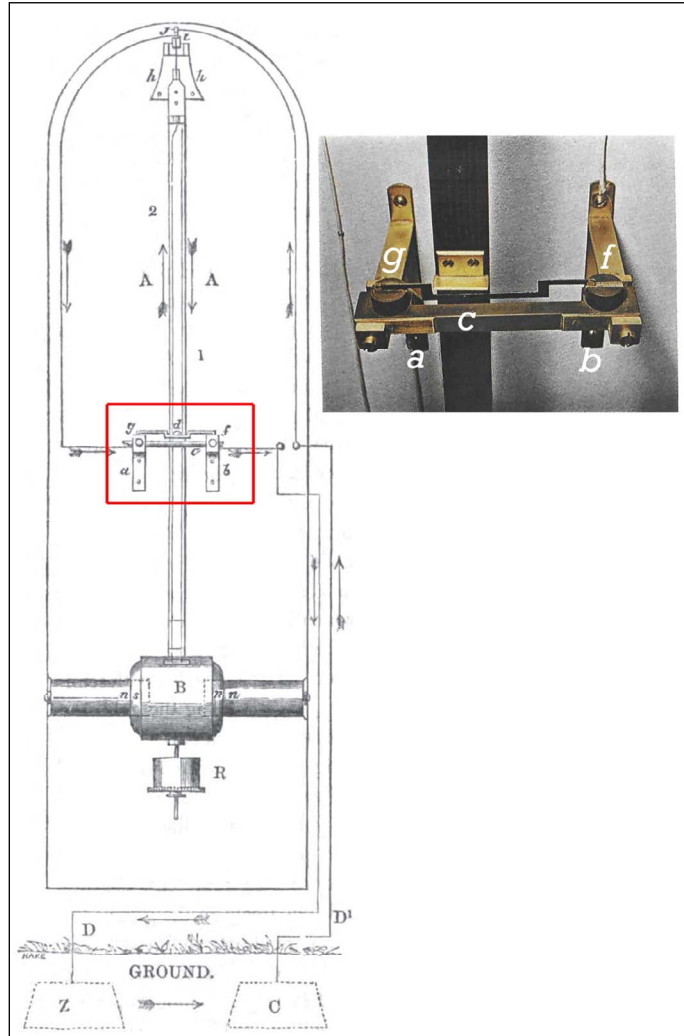
Denge noktasından uzaklaştırılarak salınıma sokulan bir sarkaç düşünelim. Sürtünme ve diğer kayıp mekanizmalarının yol açtığı sönümlenme sonucunda sarkacın salınım genliği zaman içerisinde gittikçe azalarak en sonunda sıfırlanacaktır. Bu esnada birbirini takip eden iki döngü için salınım genliklerini A_1 ve A_2 olarak kabul edelim. Bu durumda salınımın kalite faktörü, Q , için şu bağlantıyı yazabiliriz:

$$Q = \pi / \ln (A_1 / A_2)$$

A_1 ve A_2 birbirlerine ne kadar yakın iseler Q o kadar yüksek olur. Örneğin iyi bir sarkaç için bu değer 10.000 ile 100.000 arasında değişebilir. Bu şekilde salınım yapan bir çınlaçta enerji vererek sönümlenme etkisini yenmek mümkündür. Ancak bu iş için gereken itki, sisteme bir müdahaledir ve doğru esnada yapılmazsa bir faz farkı yaratarak salınımın devir süresini değiştirebilir. Airy prensibine göre bu itkinin, sarkaç hızının en yüksek değere ulaştığı noktada yapılması gerekir. Bu müdahalenin sarkaca maşa kullanarak mekanik yollardan yapılması yerine elektriksel olarak yapılması 1840 yılında gerçekleşti. Bunun sonucunda ortaya çıkan cihaz, ilk elektrikli saat olarak bilinir [21].

İlk elektrikli saatin mucidi olan Alexander Bain, telgraf alanında da çalışmış, asıl mesleği saatçilik olan, elektrik konusunda resmi bir eğitim almamış bir kişi idi. Elektrikli saat konusunda aldığı 1841 tarihli patentinde sadece tek bir saatten değil, merkezi bir saatin ürettiği sinyale bağlı olarak tüm ülke çapında, eşzamanlı çalışan bir saatler ağından da bahsetmiştir. Zamanının çok ötesinde bir vizyon gösteren bu patentin de arkasında bu çalışmada gördüğümüz diğer önemli patentlerden farklı olmayarak büyük bir mücadele ve rekabet hikayesi yatar [21, 22].

Bu ilk elektrikli saatin bir çizimi Şekil 7'de görülebilir. GRO-UND ile işaretli yer altına 1 m derinde olacak şekilde yerleştirilmiş çinko (Z) ile bakır ya da kömür halinde karbon (C) plakaların oluşturduğu bir galvanik hücre, saatin çalışmak için ihtiyaç duyduğu elektrik akımını sağlar. Saat üç ana par-



Şekil 7. İlk Elektrikli Saat [23] ve Kutu İçindeki Şalterin (sinyal tetikleme mekanizmasının) Orijinal Saatteki Görüntüsü [22]

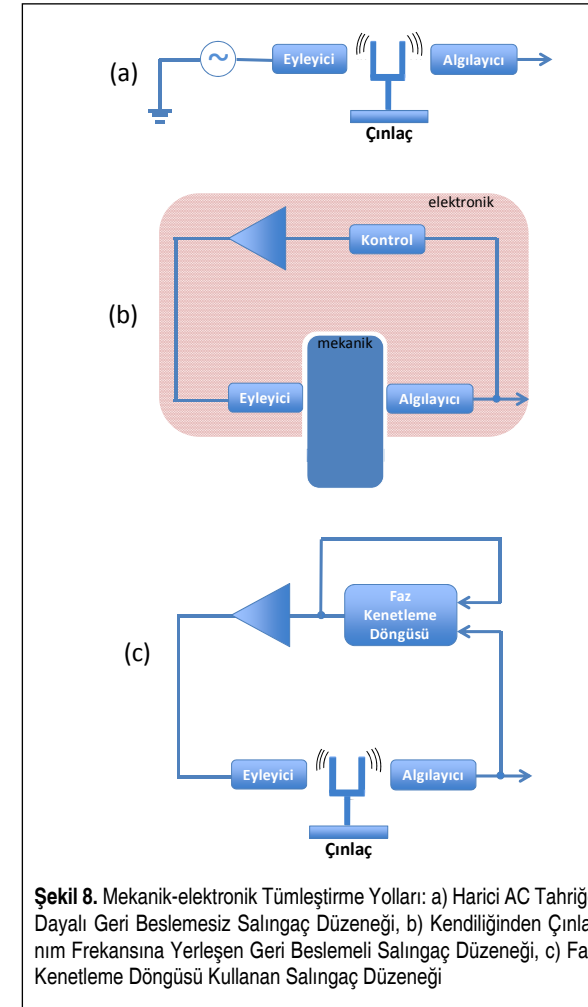
çadan oluşmaktadır: i) Ucunda B ve R parçalarını taşıyan ve h parçası ile sabitlenmiş sarkaç. B, ortası boş, bakır tel bir bobindir ve içinden elektrik akımı geçtiğinde sağ ucu kuzey (n), sol ucu güney (s) kutbu olacak şekilde yerleştirilmiştir. R ise sarkaç ucuna yerleştirilmiş bir küttedir. ii) Kuzey kutupları (n), B bobininin içine girecek şekilde saat şasisine sabitlenmiş iki adet mıknatıs. Bobinin ortasındaki boşluk, bu iki mıknatısın sarkaç hareketini kısıtlamayacağı kadar geniş tutulur. iii) Galvanik hücrede üretilen akımın, B bobinine iletimi için zamanlama vazifesi gören şalter. Bu şalterin sabit kısmı a ve b dirsekleri arasında bulunan tahta ya da fil dışından yapılmış bir çubuktan oluşur. Bu çubuğun f ucunda altın bir parça, g ucunda ise akik bir parça bulunur. Her iki parçanın içerisinde birer oluk bulunur. Akik parçanın içerisindeki oluk yüzeyinin bir kısmı altındır. Bu iki oluk içerisinde rahatlıkla hareket eden ve d pimi ile sarkaca bağlı olan metal f-g çubuğu bir şalter vazifesi görür. Çubuğun g ucu akik oluk içerisindeki

altın kısma temas ettiğinde devre kapanır, B bobini bir elektromıknatıs haline alır. Bu elektromıknatıs, sağ taraftaki sabit mıknatıs tarafından itilirken sol taraftaki sabit mıknatıs tarafından da çekilir. Bu sayede kısa bir süre için sarkacın ihtiyaç duyduğu itki uygulanmış olur.

3.2 Mekanik-Elektronik Tümlleştirme Prensipleri

İlk elektrikli saatten sonra elektriksel itkinin kullanıldığı uygulamalar hızla artmıştır. Ses çatalı ve kuvars kristalleri ile devam edip günümüzde 1965'te gerçekleştirilen ilk örneğini yukarıda verdiğimiz mikro ve nano ölçekte çeşitli mekanik çınlaçlarla devam eden gelişme, elektronik ile tümlleştirme sayesinde mümkün olmuştur. Bu tümlleştirme genel prensiplerini Şekil 8'de görebiliriz. Resmedilen salıncak mekanizmasının merkezinde, frekans referansı olarak görev yapan bir mekanik çınlaç bulunmaktadır. Bu çınlaç bir eyleyici tarafından tahrik edilerek yukarıda bahsedilen kayıpların önüne geçilmek suretiyle salınımların devamı sağlanır. Şekil 8a'da bir tarafından söz konusu eyleyici ile tahrik edilip diğer tarafından, çınlaçın uğradığı yer değişikliğini tekrar elektriksel sinyale çeviren bir algılayıcı ile hareketleri takip edilen bir mekanik çınlaç görüyoruz. Bu haliyle sistemde bir frekans taraması yapıldığında çıkış sinyalinin genliğinin ölçülmesiyle çınlanım frekansı tespit edilebilir. Ancak bu sistemin harici bir AC güç kaynağı ile mütemadiyen sürülmemesi halinde kalite faktörüne bağlı olarak belli bir zaman sonra salınım genliği, algılama sınırının altına düşecek ve salınım sönümlenecektir.

Pratik uygulamalar için uygun olmayan bu sistem yerine, çalıştırıldığında kendi kendine çınlanım noktasını bulan salıncaklar makbuldür. Bu tür salıncaklar, genellikle Şekil 8b'de gösterilen tarzda bir geri besleme döngüsü kullanırlar. Mekanik çınlaç, yine bir eyleyici ve algılayıcı arasına yerleştirilir. Ancak bu sefer eyleyici, harici bir AC güç kaynağı ile değil, algılayıcının çıkış sinyalinin işlenmiş bir hali ile sürülür. Çeşitli gürültü kaynakları etkisinde çınlaçın yaptığı hareketler algılayıcı tarafından elektriksel bir sinyale çevrildikten sonra bir yükselteçten geçer ve uygun faz ve genlik kontrolüne tabi tutulur. Bu kontrol gereksinimi en basit haliyle şöyle düşünülebilir: Bir çınlaçın üzerine etkiyen kuvvet ile ortaya çıkan yer değiştirme arasında -diğer bütün etkiler ve devre elemanları göz ardı edildiğinde- 90° faz farkı vardır. Faz farkı uygulanan sinyal daha sonra eyleyiciye uygulanır. Bu sayede doğru anda ve doğru faz ile uygulanan tahrik sinyali, çınlaçın frekansının geribildirim döngüsünün devam etmesini sağlar. Üst üste çalışan bu döngü sayesinde salıncak, kararlı bir şekilde referans frekansına oturmuş olur. Sistemin başarılı çalışması için, geribildirim döngüsünün hassas ayarı son derece önemlidir. Özellikle seri üretim sonucu elde edilen çınlaçların frekansları arasında özellikle boyutsal toleranslar sebebiyle oluşan farklılıkların telafisi, kontrol birimindeki pasif devre elemanlarının tek tek ayarlanmasını zorunlu kılmaktadır.



Şekil 8. Mekanik-elektronik Tümlleştirme Yolları: a) Harici AC Tahriği Dayalı Geri Beslemesiz Salıncak Düzenegi, b) Kendiliğinden Çınlanım Frekansına Yerleşen Geri Beslemeli Salıncak Düzenegi, c) Faz Kenetleme Döngüsü Kullanan Salıncak Düzenegi

Bu sebeple geri besleme döngüsüne bir faz kenetleme döngüsü (PLL, phase-locked loop) eklenmesi en pratik çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Söz konusu faz kenetleme döngüsü, bir adet faz dedektörü ve bir adet voltaj kontrollü salıncaktan oluşur. Faz dedektörü, mekanik çınlaçtan gelen referans sinyali ile faz kenetleme döngüsünün çıkış sinyalinin frekanslarını karşılaştırır ve aradaki hatayı bularak bununla orantılı bir sinyal üretir. Bu sinyal daha sonra bir voltaj kontrollü salıncaca iletilir ve giriş sinyaline bağlı bir sinyal çıkışı elde edilir. Bu sinyalin faz kenetleme döngüsüne geri beslenmesi ile döngü tamamlanmış olur. Bu sayede, salıncak, çınlanım frekansına oturur ve frekansta zaman içerisinde harici etkiler sebebiyle ortaya çıkacak değişiklikleri takip edebilir.

3.3 Ses Çatalı ve Kuvars Kristal

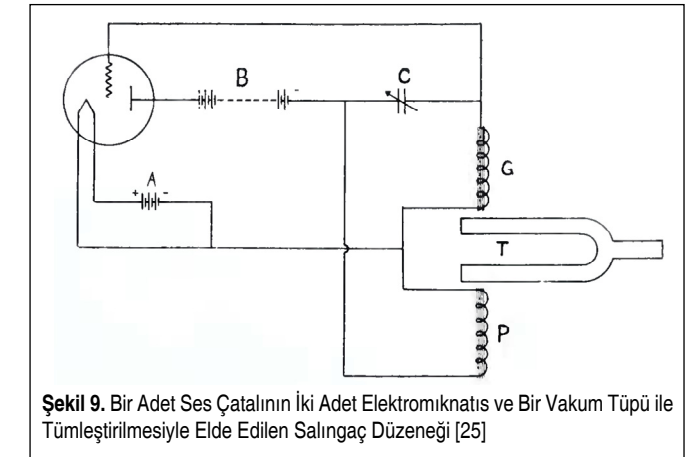
Sarkaçtan sonra ses çatalı büyük bir hızla frekans referansları olarak kullanılmaya başlandı. Ses çatalı, 1711 senesinde Handel'in orkestrasındaki John Shore isimli trompetçi tarafından bulunmuştur [24]. Ses çatalının elektriksel yöntemlerle çınlanımda tutulması ise 1857 senesinde Jules Lissajous tarafından gösterildi [24]. Bunun için genellikle ses çatalının iki

ucu arasına yerleştirilmiş ve tahrik görevi gören bir elektromıknatıs ile ses çatalının bir ucuna bağlı bir akım kesici kullanılırdı. Ses çatalının uçlarının hareketi, tahrik mıknatısını besleyen doğru akımı belli aralıklarla açıp kapatan bir anahtar görevi görür ve kendi kendine doğal frekansında işleyen bir salıncak elde edilmiş olurdu. Bain'in elektrikli saatine çok benzeyen bu prensip, içerdiği metalik temas zorunluluğu sebebiyle frekans sapmalarına yol açıyordu.

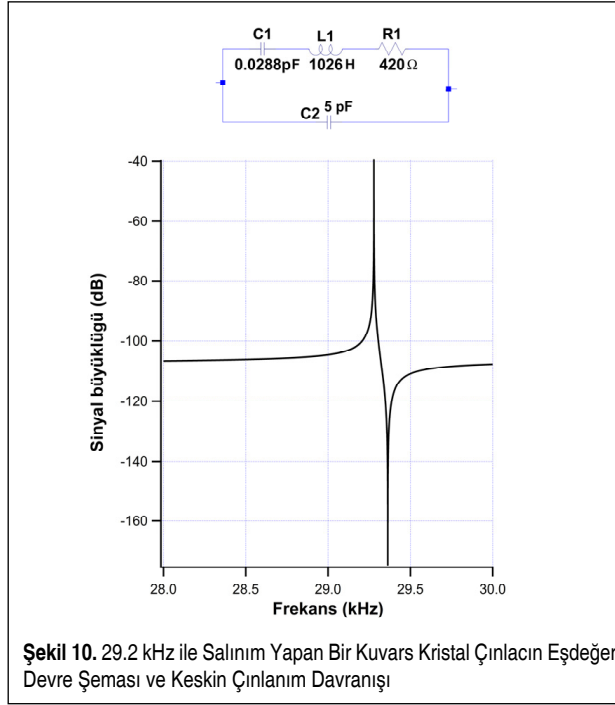
1907 senesinde vakum tüplerinin yükselteç olarak kullanıma dair ilk patent yayınlandıktan sonra bunların telefon çalışmalarında kullanılması hızlandı. Bu esnada, Şekil 8b'de gösterildiği şekilde çıkış sinyalinin yükselteç giriş sinyaline kuplajlandığı devrelerin salınımına girdiği sık sık gözlemlenmiştir. Birçok uygulama için oldukça rahatsızlık verici bu etkinin salıncak uygulamaları için önemi fark edilerek 1912 senesinde, çınlaç kısmı elektriksel devrelerden oluşan ve geri beslemeyi vakum tüpü yükselteci üzerinden yapan salıncaklar yapılabilir. Burada kullanılan elektriksel çınlaçların frekansları, zaman içinde eskime ile ya da sıcaklık değişimleriyle çok kolay kayabiliyordu. 1919 senesinde aynı geri besleme prensibi ile elektriksel çınlaç devreleri yerine mekanik çınlaç - yani ses çatalı- kullanan ilk salıncak W. H. Eccles tarafından rapor edilmiştir [24].

Şekil 9'da Eccles'in salıncacına benzer bir devre verilmektedir. Manyetik bir malzemeden imal edilen ses çatalı T ile işaretlidir. Algılayıcı olarak görev yapan elektromıknatıslardan birinin (G) sinyali, daire içerisinde gösterilen vakum tüpü tarafından yükseltilecek eyleyici olarak görev yapan ikinci bir elektromıknatısa (P) tatbik edilir. Bu şekilde akım kesicinin yarattığı mekanik temas etkileşimi yok edilmiş ve düzenek, gelişmiş geribildirim devrelerinin uygulanması için uygun hâle gelmiştir.

Ses çatalı ile aynı zamanlarda kuvars kristal çınlaçlar üzerinde de çalışmalar yapılıyor idi. Kuvars, silisyum dioksit, mukavemeti ve kimyasal kararlılığı yüksek kristal formlarından birisi olup piezoelektrik özellik gösterir. Genellikle iki



Şekil 9. Bir Adet Ses Çatalının İki Adet Elektromıknatıs ve Bir Vakum Tüpü ile Tümlleştirilmesiyle Elde Edilen Salıncak Düzenegi [25]

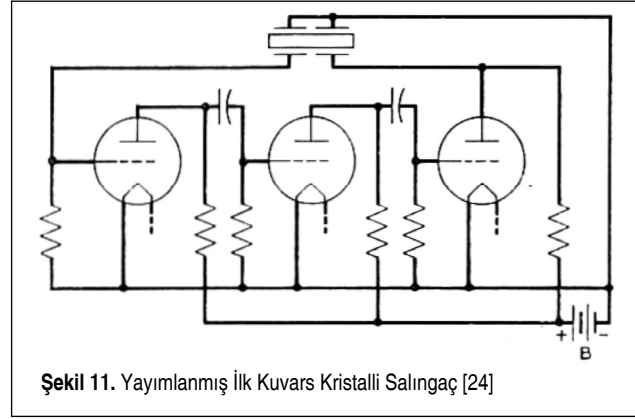


Şekil 10. 29.2 kHz ile Salınım Yapan Bir Kuvars Kristal Çınlacın Eşdeğer Devre Şeması ve Keskin Çınlanım Davranışı

tarafından metal kaplanarak yine metalden yapılmaya mesnetler arasına sabitlenir. Kristalin mekanik gerilmeye maruz bırakılması sonucunda kristali çevreleyen bu iletken yapıda bir potansiyel meydana gelir. Aynı şekilde kristalin bir elektriksel alana yerleştirilmesi kristalde şekil değişikliğine yol açar. Kristali tahrik eden AC alanın frekansı, kristalin doğal frekansı ile örtüştüğünde kristalin bu şekil değiştirme salınımlarının genliği de oldukça artar.

Bu tür kuvars kristal çınlacıların iç kayıpları son derece azdır. Eğer doğru mesnet şekli de kullanılırsa, düşük iç kayıplar, son derece yüksek kalite faktörlerine yol açar. Bu sayede, kristali çınlanımda tutmak için gerekli dış tahrike oldukça seyrek aralıklarla ihtiyaç duyulacağı için başlangıçta bahsettiğimiz hariçi etkinin yarattığı faz kaymaları da en az seviyeye inmiş olur. Bu tür çınlacıların eşdeğer elektrik devreleriyle modellenmesi mümkündür [24]. Şekil 10'da benzer bir devre şeması [24] ve devrenin oldukça keskin bir çınlanım gösteren çıktısı görülmektedir.

Kuvars çınlacı kullanarak yapılmış ilk salıngaç şeması Şekil 11'de verilmiştir. Vakum tüplerinden oluşan bir yükseltici devre tarafından sürülen çubuk şeklinli kuvars kristali, bir elektrot çifti tarafından tahrik edilerek salınmaya sokulur. Diğer elektrot çifti ise kristalde oluşan gerilemelerin yarattığı elektrik sinyalini yükseltici devreye geri besler. Bu sayede Şekil 8b'de verilen salıngaç prensibi takip edilmiş ve frekansı sadece kuvars tarafından belirlenmiş bir salıngaç oluşturulmuştur [24]. 1921'de geliştirilmiş olan bu yaklaşım sonraları birçok farklı kuvars ve diğer piezoelektrik kristal uygulamalarının önünü açtı. Kuvars kristal çınlanım frekansları, 1920'ler



Şekil 11. Yayınlanmış İlk Kuvars Kristalli Salıngaç [24]

boyunca geliştirilen çeşitli frekans bölme yaklaşımlarıyla bir motoru çevirecek frekanslara düşürüldüğünde, kuvars saatin önü de açılmıştır. Bir yüksek frekans referansı ve frekans bölücü bir devre kullanan ilk kuvars kristal saat, Bell Telefon Laboratuvarı'nda çalışan J. Horton ve W. Marrison tarafından 1927'de rapor edilmiştir [26].

Rapor edilen bu ilk kuvars saatte, 50 kHz'lik bir kristal çınlacı kullanılmıştır [26]. Dikdörtgen prizma şeklinde kesilmiş olan kristal, monte edilmiş hali ile Şekil 12'de gösterilmektedir. İki rijit ve iletken plaka arasına yerleştirilmiş olan kristal, rahat salınım yapması için bir keçe parçası üzerinde durmaktadır. İletken plakalarla kristal arasına da bir ipek iplik tabakası bulunmaktadır. Plakalar arasındaki mesafede 10 µm'lik bir değişikliğin frekansta önemli oranda bir kayma yaratacağı bilindiğinden montaj şeklinin hassas ayarı önemlidir. Aynı şekilde frekans kaymasınının 0.1 ppm içinde tutulması için sıcaklık kontrolünün 0.025°C mertebesinde olması gerektiği rapor edilmiştir [26].



Şekil 12. İlk Kuvars Kristal Saatte Kullanılan Çınlacı Birimi [24]

3.4 Kuvars Kol Saati Örneğinde Frekans Referanslarının Teknolojik Etkisine Bir Bakış

Kurulu bir zemberek tarafında sürülen mekanik bir saatteki sarkaç, genelde 5 Hz ile çalışır. Bu tür saatlerin bir gün

içerisinde 3 saniye kadar kayması olağandır. Bu düzeneğe alternatif geliştirmesi için İsviçre'de Bulova firması tarafından görevlendirilen Max Hetzel isimli elektrik mühendisi, kol saatine 360 Hz ile çalışan bir ses çatalı entegre etmiştir. Bu saat, 1960 senesinde Accutron olarak lanse edilmiş ve büyük heyecan yaratmıştır. Lip-Elgin ortaklığı prototipleri ve Hamilton Watch Company'nin 1957'de piyasaya sürdüğü saatle beraber Accutron ilk elektromekanik kol saati olma özelliği taşır ve ses çatalı sayesinde iyi ayar edilmiş bir mekanik saate nazaran on kat daha hassas zaman tutabilmektedir. Bu sayede 1960'larda uzay çağı için kültürel bir ikon haline gelecektir.

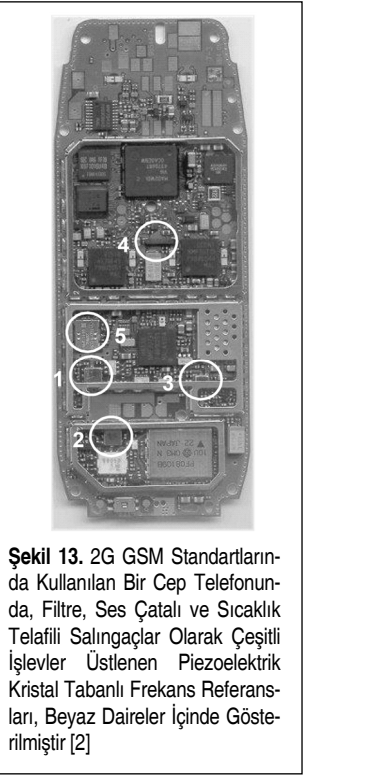
Bunu takiben kuvarsa geçilmesiyle salıngaç salınımları kHz üzerine çıkar. Kuvarsin kol saatinde kullanımı, 1969'da satışa sunulan Seiko Astron SQ modeli ile olmuştur. Bu projeyi sonradan Seiko Epson'un başkanı olacak olan Tsuneya Nakamura tarafından yönetilen on kişilik bir makine mühendisi grubu gerçekleştirmiştir. Buna paralel olarak İsviçre'de kuvarsa geçiş, saat endüstrisinin kalbi olan Neuchatel'de saat üreticilerinin bir konsorsiyumu olarak kurulan Centre Electronique Horloger'de (CEH) Stanford doktoralı bir fizikçi olan Max Forrer idaresinde gerçekleştirilmiştir. 1967'de Neuchatel Rasathanesi'nde düzenlenen senelik kronometre yarışmasında CEH tarafından gerçekleştirilen kuvars bazlı prototipler, Seiko prototiplerinden az miktarda daha iyi, ama mekanik saatlere göre muazzam bir performans göstermişlerdir. Mekanik düzeneklere nazaran sağlanan bu performans artışı, senelik kronometre yarışmalarının da sonunu getirecektir. İsviçre'nin ilk kuvars kol saati, Japonya'dan bir sene sonra, 1970'de, on altı farklı üretici firmanın ticari isimleriyle piyasaya sürülmüştür. Kuvars saatlere uyum sağlayamayan muhafazakâr İsviçre saat üreticileri, dünya saat piyasasındaki payları 1983'te %10'un altına düştüğünde ancak yeni bir yapılanma ile Swatch sayesinde ivme kazanabileceklerdir. ABD'de ise Hamilton Watch Company geleneksel Amerikan yaklaşımıyla endüstriyel ortaklıklar ve askeri destek sağlayarak 1972'de LED ekranlı Pulsar'ı piyasaya o zamanki ufak bir araba fiyatı olan 2100 dolardan piyasaya sunmuştur. Pulsar'ın CMOS yongalarını RCA, LED ekranını Monsanto ve kuvars çınlacını Clark Crystal imal etmiştir. Texas Instruments, Fairchild ve National Semiconductor gibi yarı iletken firmalarının piyasaya girmesiyle Hamilton Watch Company 1974'te İsviçreli'ere, firmanın Pulsar'ı barındıran Time Computer Inc. kısmı ise yine yetmişlerin sonunda Seiko'ya satılacaktır. Yetmişlerin sonunda Amerikan yarı iletken firmalarının da çekilmesiyle Japon ve Hong Kong firmaları piyasayı tamamen ele geçirirler. Günümüzde artık en basit elektronik oyuncakta bile bu tür salıngaçlar kullanılmaktadır [27].

Taşınabilir frekans referansları için önemli bir örnek teşkil

eden kol saatleri ile ilgili bu başarı hikayesinin temelinde iki teknik özellik yatar:

- 1) Ufak boyutun getirdiği düşük güç sarfiyatı ve bunun sonucu gelen devingenlik (mobility),
- 2) Artan frekans ve frekans kararlılığı ile gelen hassasiyet artışı.

Dolayısıyla günümüzde cep telefonları da dahil taşınabilir bütün frekans referanslarında bu tür salıngaçlar kullanılır. Şekil 13'te 2G GSM standartlarında kullanılmış olan telefon birimindeki çeşitli piezoelektrik kristal tabanlı salıngaçlar görülebilir.



Şekil 13. 2G GSM Standartlarında Kullanılan Bir Cep Telefonunda, Filtre, Ses Çatalı ve Sıcaklık Telafili Salıngaçlar Olarak Çeşitli İşlevler Üstlenen Piezoelektrik Kristal Tabanlı Frekans Referansları, Beyaz Daireler İçinde Gösterilmiştir [2]

4. GÜNÜMÜZDE SALINGAÇ TEKNOLOJİLERİ

Günümüzde salıngaç teknolojileri üç ana sınıf altında toplanabilir:

- i) Tamamen elektronik olan salıngaçlar.
- ii) Kuvars ve diğer piezoelektrik kristal tabanlı salıngaçlar.
- iii) MEMS tabanlı salıngaçlar.

4.1 Elektronik Salıngaçlar

Tümleşik devre salıngaçları, klasik RC boşalmalı titreşim üretici veya LC salıngaçlara dayanan devrelerden oluşur. CMOS salıngaç ya da silisyum saat olarak da bilinirler. Hassasiyetleri (frekandaki kayma miktarı) %0.5-1.5 arasında değişir [2, 28]. Nispeten düşük hassasiyetlerine rağmen Si tabanlı tümleşik devre ile uyumlu olmaları bir avantajdır. Bu sebeple frekans hassasiyetinin önemli olmadığı fakat boyut ve fiyatın kritik olduğu uygulamalarda yer alırlar. Aynı bir mekanik salıngaça ihtiyaç duymadıklarından şoka karşı çok dayanıklıdırlar. Son senelerde yapılan geliştirme çabaları ile yonga üzeri sıcaklık telafisi de kullanılarak 100 ppm civarı hassasiyet rapor edilmiştir. Ne var ki bu tür salıngaçlar, kuvarsa göre daha yüksek güç sarfiyatı gerektirmektedirler. Aynı zamanda düşük kalite faktörlerinden muzdariptirler [2, 29]. Mobius Microsystems ya da Silabs gibi firmaların faaliyet gösterdiği bu alandaki ürün performansı, henüz kuvars kristal performansının altın-

dadır ve gelecekte dezavantajlarının müsaade ettiği ölçüde belli alanlarda kuvarsın yerini alabilme ihtimalleri vardır.

4.2 Kuvars ve Diğer Piezoelektrik Kristal Salıngaçlar

Bir kristal salıngaç, titreşen bir piezoelektrik kristalin mekanik çınlanımını sabit frekanslı bir elektrik sinyale çevirir. Kristalin doğru açı ile kesilmesi, ısı etkileri tamamen bertaraf edebilir. Günümüzde kuvars kristaller ve diğer piezoelektrik kristal içeren kristal salıngaçlar, endüstride standart haline gelmişlerdir. 2008 senesinde 4 milyar dolarlık bir piyasa oluşturmuşlardır [2]. Özellikle kuvars, diğer ucuz kristallere göre yüksek kalite faktörleri ve sıcaklıktan bağımsız, kararlı davranışı sayesinde güvenilir frekans referansı olarak kabul görmektedir. Kuvars salıngaçların gösterdiği hassasiyet 1-100ppm arası değişir. PZT gibi daha basit piezoelektrik kristallere dayalı salıngaçlar ise konvansiyonel elektronik salıngaçlarla aynı mertebede, %0.1-1 arası hassasiyet gösterirler [2, 30].

Günümüzde özellikle eğlence, oyun ve taşınabilir elektronik alanında olağanüstü büyüme, gittikçe daha küçük kuvars ve diğer kristal salıngaçlara olan ihtiyacı arttırmıştır. 2.0×1.6 mm² kuvars kristalleri rutin olarak tedarik edilebilmektedir. Kuvars ses çatalları da 2.0×1.2 mm² paket boyutu ile bulunabilmektedir [2]. Küçülen boyut, kristal şekillendirmesinde fotolitografi kullanımını getirmiştir. Boyutun daha da küçülmesiyle metalizasyon ve paketlemede karşılaşılabilecek teknolojik güçlüklerin de artması beklenmektedir. Sonuç olarak kuvars ve benzeri kristal salıngaçlar, Moore Yasası'na uygun bir küçülme sürecinden geçmemiş ve bu sebeple maliyet, güç sarfiyatı, kaplanan yer ve tasarımda döngü hızı bakımından dezavantajlı bir konuma gelmişlerdir [29].

4.3 MEMS Salıngaçlar

Kuvarsa alternatif olarak geliştirilen MEMS salıngaçlar, kuvars kristali yerine salınım yapan ufak bir silisyum kütlesi ile

çalışırlar ve gittikçe daha fazla elektronik uygulamada kendilerine yer edinmektedirler. Salıngaç gelişimindeki tarihsel süreç içerisinde ticarileşmiş en yeni çözümü teşkil etmektedirler. 2010 senesinde dünya MEMS salıngaç pazarının 21.4 milyon dolar olduğu ve bunun 2014'te 312 milyon dolara çıkacağı tahmin edilmektedir [31]. Kuvars ve diğer kristal salıngaçlara nazaran (2008 için 4.1 milyar dolar) bu ufak bir pazar olsa da MEMS salıngaçların kısa tarihçesi göz önüne alındığında önemli bir atılım yaşandığı görülmektedir. Bu önemli atılımın iki sebebi vardır:

1) MEMS salıngaç üreticilerinin, kuvars tabanlı salıngaçların eksik taraflarına hitap etmeleri: Kuvarsın sıcaklıktan bağımsız davranışı ve frekans hassasiyeti her ne kadar iyi olsa da özellikle taşınabilir uygulamalarla beraber gelen küçük boyut ihtiyacı sonucunda kuvars salıngaçlar, maliyet, tedarik zamanı ve güç sarfiyatı konularında dezavantajlı bir konuma gelmektedir. MEMS salıngaçlarda ise tam tersine yonga plakası mertebesinde (wafer-level) imalat, paketleme ve test olanakları, maliyetleri düşürmektedir. Aynı zamanda diğer işlevsel MEMS bileşekleriyle uyumluluk (sözgelimi cayroskop, düşük frekanslı çınlaçlar, ivme ölçerler ve diğer algılayıcılar) ileride ortaya çıkabilecek farklı uygulamalar için birer avantaj yaratmaktadır. Buna ilaveten MEMS salıngaçların şok dayanımlarının kuvarsa nazaran daha iyi olduğu bilinmektedir. 100.000 g'ye kadar rapor edilmiş şok dayanımları mevcuttur (Vectron firmasının VMEM5Q modeli). Ayrıca mekanik çınlaç malzemesi olarak silisyum, güvenilirlik (reliability) açısından da kuvarsa üstünlük sağlamıştır. JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) ve HTOL (high-temperature operating life) testlerinde kuvarsın 10 ila 30 milyon saat arızasız çalışma performansına karşılık silisyum 500 milyon saatlik performans göstermiştir. Son olarak frekans ayarı (akort) konusunda – ki bu konuda daha detaylı bir tartışma aşağıda yer almaktadır – MEMS salıngaçların kuvarsa nazaran en az 10 kat daha geniş bir bant aralığı bulunmaktadır [30, 31].

2) MEMS tabanlı salıngaçların erken dönemlerindeki eksikliklerin giderilmiş olması: MEMS tabanlı salıngaçların erken uygulamalarında karşılaşılan yüksek güç sarfiyatı, yüksek faz gürültüsü, silisyumun sıcaklığa bağlı özelliklerinde değişme gibi eksiklikler yoğun geliştirme çalışmalarıyla giderilmektedir. Temiz ve yüksek vakumlu paketleme yöntemlerinin geliştirilmesi, sıcaklık telafisinin geliştirilmesi (Sand 9 firması) bu yönde önemli adımlar olmuştur [31].

MEMS salıngaç alanında Discera, Sand 9, Silicon Labs, SiTime ve Vectron gibi firmalar faaliyet göstermektedir. Discera, 19.2 MHz'lik ilk ticari ürünlerini 2003 senesinde piyasaya sürmüştür. Bu salıngaçlardaki silisyum çınlaç, 30 µm × 8 µm² boyutlarında bir çubuk şeklinde idi. 2006 senesinde SiTime, kesirli N PLL kullanan, programlanabilir, 5 MHz'lik SiT8002 serisi salıngaçları piyasaya sürmüştür. Bu ürünlerin kuvars endüstrisinde yarattığı etki oldukça büyük olmuştur. Ticari olmayan, Si mikro imalatına dayalı prototip mikromekanik çınlaçlar, günümüzde GHz mertebelerinde 10.000'i aşan kalite faktörleriyle çalışmaktadırlar [32]. Ticarileşmek için ise hassasiyet, kararlılık kısıtlarının uygunluğu önem kazanmaktadır. MEMS salıngaç piyasasında günümüzde 1 MHz ile 200 MHz arası çalışabilen geniş bir ürün yelpazesi mevcuttur. Örnek olarak en ileri üç ürünün karşılaştırmalı performansları aşağıdaki tabloda verilmektedir [30, 31].

4.4 Gelecek ve NEMS Tabanlı Salıngaçlar

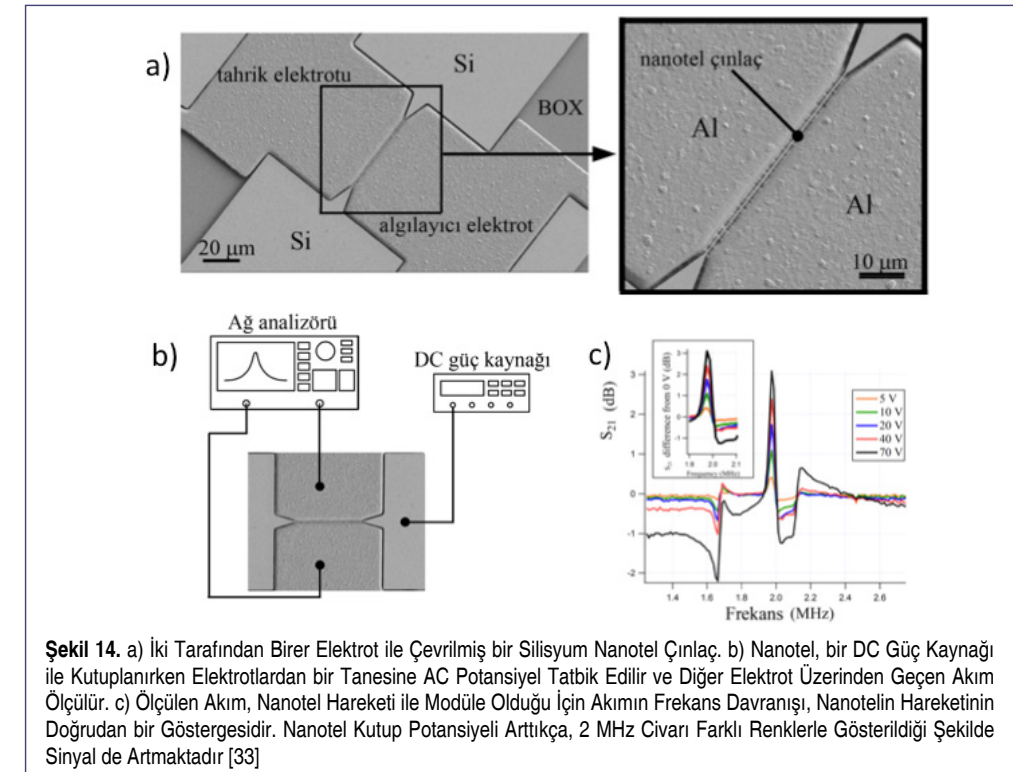
Her ne kadar günümüzde iletişim uygulamalarında 6 GHz

altında kalan frekanslara ihtiyaç duyulsa da nanomekanik çınlaçların oluşturacağı ağlar, tamamen pasif, çok az güç sarfiyatı gerektiren bileşekler olarak, yukarıda çizilen tarihsel çerçevede MEMS salıngaçların dönüşmesiyle gelecekte 10 GHz sonrası frekans ihtiyacı için ürün haline dönüşeceklerdir [32]. Bu tür nanomekanik çınlaçlar, MEMS'in taşıdığı yonga plakası mertebesinde imalat, paketleme ve test olanakları ile bunların getirdiği diğer elektromekanik ve elektronik sistemlerle uyumluluk ve entegrasyon olanaklarına sahip olacaktırlar. Bunun doğrudan bir sonucu olarak bu tür elektromekanik sistemlerde Moore kuralı benzeri bir gelişme gözlemlenecek, düşen maliyetlerle beraber artan cihaz yoğunluğu söz konusu olacaktır. Frekanslar ve kalite faktörleri artarken azalan çınlaç kütlesi ile beraber şok dayanımlarında artış meydana gelecektir. Güç sarfiyatı MEMS salıngaçlara nazaran daha da azalacaktır. Tüm bu performans kriterleri, çınlaçların taşınabilir uygulamalardaki kullanımına doğrudan etki edecektir. Sonuç olarak nanomekanik çınlaçlar, MEMS'in taşıdığı avantajları daha da ileriye götürerek yeni nesil salıngaçların temelini oluşturacaklardır.

Burada örnek olarak bir nanotel çınlaç düzeneğine bakalım. Söz konusu düzeneğe biri elektrostatik tahrik diğeri algılama amaçlı iki adet alüminyum elektrot bulunmaktadır. Bu iki elektrotun arasına bir adet silisyum nanotel yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 14a). Nanotel ile her bir elektrot arasındaki mesafe 900 nm civarındadır. Nanotel ile mikro boyutlu elektriksel bileşeklerin seri imalata uygun şekilde optik litografi ile mükemmel bir şekilde hizalanması, Şekil 6'da gösterilen ilk

Tablo 1. MEMS Tabanlı Ürünlerinin Karşılaştırmalı Performans Değerlendirmesi [31]

	Vectron VMEM5Q	SiTime SiT8004	Discera DSC2011
Frekans	150 MHz'e kadar	125-150 MHz arası	10-170 MHz arası
Güç sarfiyatı	Bilgi mevcut değil.	125 MHz'de 6.7 mA	Bilgi mevcut değil.
Frekans kararlılığı	± 25 - ± 100ppm	± 20 - ± 50ppm	± 10 - ± 50ppm
Şok dayanımı	10 ⁵ g	5×10 ⁴ g	MIL-STD-883
Sıcaklık	-20/ 70 °C, -40/ 85 °C	-20/ 70 °C, -40/ 85 °C	-20/ 70 °C, -40/ 85 °C, -55/ 125 °C
Fiyat	Bilgi mevcut değil	\$ 0.98 (10.000 parça için)	< \$ 1.75 (10.000 parça için)



mikro boyutlu elektromekanik çınlacın 1960'larda gerçekleştirilmesi esnasında Nathanson ve Wickstrom'un karşılaştığı montaj problemini hatırlatmaktadır ve günümüz teknolojisi için önemli bir zorluk teşkil etmektedir.

Nanotel çınlaç bir DC potansiyel ile kutuplanır. Tahrik elektrotuna uygulanan AC sinyali ile nanotel üzerinde bir elektrostatik kuvvet yaratılmış olur. Bu kuvvet altında salınım giren nanotel ile algılayıcı elektrot arasındaki mesafe ve dolayısıyla sığa, salınım frekansını takip edecek şekilde değişime uğrar. Sığadaki bu değişim sayesinde nanotel çınlacın hareketine bağlı bir akım meydana gelir. Çınlanım esnasında kalite faktörüne bağlı olarak artan yer değiştirmeler ile bu akımın da değeri artacaktır. Yer değiştirmeler her ne kadar artsa da çınlaç boyutlarının küçüklüğü, oluşan akımın çevresel (parazitik) etkiler karşısında oldukça zayıf kalmasına yol açar. Bu husus, hizalama problemlerinden sonra bugünkü teknoloji ile nano boyutlu çınlaçların elektronik tümleştirilmesi konusunda ortaya çıkan zorlukların bir ikincisidir. Şekil 14b'de kullanılan ağ analizörü gibi ölçüm cihazları ile bu akımın okunması mümkün olmaktadır. Şekil 14c'de farklı kutuplama potansiyelleri altında nanotel çınlacın frekans davranışı verilmiştir [33]. 2 MHz civarı gözlemlenen çınlanım için kutuplama potansiyeli arttıkça sinyalin büyüklüğü de artmaktadır.

5. AKORT İHTİYACI

5.1 Elektronik Salıngaçlarda Frekans Ayarı

RF uygulamalarında ayarlanabilir salıngaç modülleri genelde varaktör kullanır ve LC devrenin frekansı bu şekilde dışarıdan uygulanan bir voltaj ile değiştirilebilir. Bu amaçla pn eklemlerin sığasının uygulanan ters voltaj ile düşmesi prensibine dayalı çalışan varaktör diyotlar kullanılır. Ayarlanabilir frekans aralığı genellikle % ± 25 mertebesinde kalır [28]. Zaten düşük olan varaktör kalite faktörü, artan sığa değerleriyle daha da düşer. Aynı şekilde sığa değişimi sağlayan mikromekanik devre bileşikleri de RF MEMS literatürüne girmektedirler [29]. Her ne kadar yonga üzeri entegrasyon için uygun bir çözüm olmasa da GHz mertebesinde YIG (yttrium/iron/garnet) küreler, manyetik olarak ayarlanabilen çınlaç kovukları olarak yüksek spektral saflık ve frekans ayarında doğruluk sebebiyle kullanılırlar [28]. Sonuç olarak bu alanda yonga üzeri entegrasyona uygun çözümlerde düşük kalite faktörleri ve ayarlanabilir frekans aralığının darlığı öne çıkmaktadır. Emekleme aşamasında olan bu alanda yeni nesil programlanabilir LC salıngaçların kararlılık performansları (örneğin Silicon Labs Si500 - 0.9-200 MHz arası çalışma aralıkları, PLL'siz ve 1ps civarı seçirme (jitter) mertebesi), kristal salıngaçlı muadillerine göre (örneğin Si570) düşüktür ve en önemli avantajları maliyet düşüklüğü olarak kalmaktadır.

5.2 Kuvars ve Diğer Piezoelektrik Salıngaçlarda Frekans Ayarı

Bir varaktör yardımı ile frekans ayarı yapılabilen voltaj kontrollü kristal salıngaçlar (VCXO) mevcuttur. Bu tür çözümlerde ayarlanabilir bant genişliği ufaktır ve merkezi frekanstan ancak ± 1000 ppm miktarında sapmalar mümkün olmaktadır [28]. Programlanabilir kristal salıngaçlar (PCXO) ise yonga üzeri bir faz kenetleme döngüsü (PLL) içerirler ve daha geniş bir frekans aralığında çıktı verirler. Örneğin 25 MHz'lik bir kristal kullanan bu tür bir salıngacın, 2-200 MHz arası çalıştırılması mümkündür. Tabii bunun karşılığında PLL kullanımıyla beraber ortaya çıkan bir faz gürültüsü söz konusu olmaktadır. Sıcaklık telafili kristal salıngaçlar da (TCXO) benzer şekilde çalışmaktadırlar. Bu tür salıngaçlarda ± 2.5 ppm frekans kararlılığına bu sayede ulaşılmaktadır [2].

5.3 MEMS Tabanlı Salıngaçlarda Frekans Ayarı

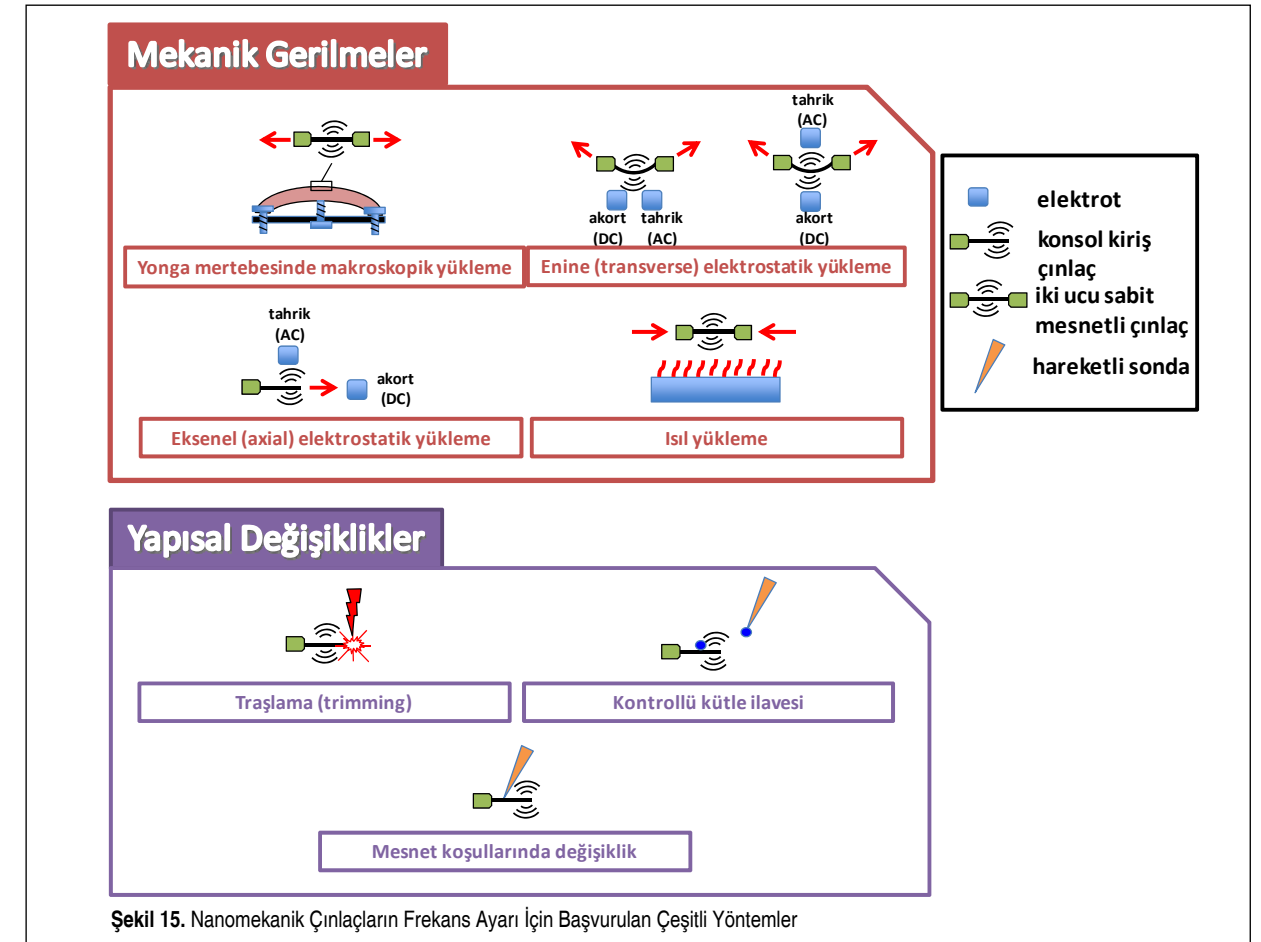
MEMS tabanlı salıngaçlarda PLL kullanılarak 1 MHz-200 MHz arası frekans ayarı mümkün olmaktadır. Örneğin Tablo 1'de verilen DSC2011 gibi Discera firmasının DSC81XX serisi salıngaçlarında 100 Hz basamaklarla 10-170 MHz arasında çalışma mümkün olmaktadır. Ne var ki kuvars salıngaçlarda olduğu gibi, burada da yapılan bu tür dijital frekans ayarları, faz gürültüsünü artırır [34].

Sahada programlamaya yönelik bu tür uygulamaların yanında sıcaklık telafisi ya da malzeme yorgunluğu gibi nedenlerle oluşan frekans kaymalarının da düzeltilmesi için akort ihtiyacı duyulmaktadır. Bu gibi durumlarda faz gürültüsü problemini ortadan kaldırmak için doğrudan salıngaç döngüsüne müdahaleye dayalı çözümler bulunmaktadır. Bu teknikler geniş bir patent yelpazesi oluştururlar [örneğin US Pat. No. 7591201, 7427905, 7211926, 7202761, 6987432, 6958566] ve ısıtma, elektrostatik kutuplama, çınlaç dizinleri veya kompozit yapı kullanımı gibi fiziksel yöntemlere dayalıdır.

5.4 Nanomekanik Çınlaç Tabanlı Salıngaçlarda Frekans Ayarı

Şekil 15, nanomekanik çınlaçlarda kullanılan çeşitli akort tekniklerinin bir özetini vermektedir. Bu çınlaçların akordu için genel yaklaşım, yapısal değişiklikler ve mekanik gerilmeler olarak ikiye ayrılabilir.

Yapısal değişikliklerle başlayalım. Nanomekanik çınlaçlarda imalat esnasında kontrol edilmesi gereken boyutların küçüklüğü, frekans ayarını oldukça kritik bir hâle getirmektedir. İmalat sonrası elde edilen çınlacın, hedeflenen frekansa çekilmesinin en basit yöntemi, çınlaç yapısına doğrudan müdahaledir. Tıraşlama (trimming) denilen bu süreç ile çınlaç bir lazer ya da benzeri bir araç kullanılarak tıraşlanır. Bu süreç nano ve mikro boyutunda sıklıkla uygulanmaktadır [3, 35].



Şekil 15. Nanomekanik Çınlaçların Frekans Ayarı İçin Başvurulan Çeşitli Yöntemler

Hatta karbon nanotüplerin yüksek alan salımı (field emission) akımları altında boylarının kısaltıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu tür tek boyutlu yapılarda çınlanım frekansının uzunluğun karesi ile ters orantılı değişmesi sayesinde, çınlaç boyunu değiştirerek geniş bir bant aralığında kaba bir frekans ayarı mümkün olmuştur [36]. Toplu süreç (batch processing) ile taban tabana zıt olan bu yöntem, zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır ve geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Büyük boyutlu salıngaçlar için kabul edilebilir bir yöntem iken, nanomekanik çınlaçlarda küçülen boyut sebebiyle bu tür müdahaleler gittikçe daha maliyetli olmaktadır.

Tıraşlamanın tersi yöntem, kütle eklemektir. Salınım yapan çınlacın üzerine kontrollü şekilde kütle yerleştirilmesi frekans ayarı amacıyla sıklıkla kullanılır. Örneğin bir sonda vasıtasıyla salınım yapan karbon nanotüplere indiyum parçacıklar yerleştirilmesi ve bu parçacığın yerleştirildiği noktaya göre frekans kayması elde edilmesi mümkün olmuştur [37]. Her ne kadar geri dönüşü olan bir teknik de olsa (sonda ile tekrar yaklaşılarak parçacığın geri alınması) pratik uygulaması mümkün gözükmemektedir. Benzer şekilde – fakat geri dönüşü olmaksızın - odaklanmış iyon ışınları [38, 39], lazer kazıma ile çınlaç kaplama [40], kimyasal buhar kaplama [41] gibi

teknikler de aynı amaç için kullanılmıştır. Bu uygulamaların çoğunluğu, boyutta küçülmenin getirdiği zorluklar sebebiyle, NEMS'ten ziyade MEMS'te görülmektedir. Burada anlatılan teknikler haricinde pratik uygulaması bulunmayan fakat iyi bir laboratuvar tekniği olarak iş görebilecek – mesela bir sonda yardımıyla çınlacın etkin boyunun değiştirilmesi [42]- teknikler mevcuttur.

Buraya kadar anlatılan süreçler pasif olup, imalat sonrası cihazın istenilen frekansa getirilmesi için kaba bir ayar mekanizması olarak işlev görürler. Yonga üzerinde aktif kontrol için geri dönüşü olabilen ve elektronik/kontrol tümleştirilmesine müsaade eden tekniklere ihtiyaç vardır. Geri dönüşü olan frekans ayar teknikleri genelde çınlaç yapısında mekanik gerilme yaratılması prensibi ile çalışır. Mekanik gerilmelerin frekansa etkisi öteden beri bilinmektedir ve nano çınlaçlara uyarlanabilen teorik formülasyon mevcuttur [43, 44]. Bir çınlaçta mekanik gerilme yaratmanın en basit yolu makroskopik şekilde yongayı yüklemektir. Örneğin bütün yonganın üç noktadan eğilerek yonga üzerindeki nanotel cihazlarda gerilme yaratılması mümkündür. Bu yaratılan iç gerilmeler, nanotelin etkin rijitliğini (effective stiffness) değiştirerek çınlanım frekansını artırır. Bu tür çalışmalarda oldukça gevrek olan

alttaş malzemeleri sebebiyle kırılma problemi ve dolayısıyla frekans ayar aralığının darlığı söz konusu olmaktadır [45]. Bu yolla yonga üzeri, tamamen elektronik bir ayar mümkün değildir.

Bu sebeple elektronik tümleştirme için tercih edilen yöntemler, elektrostatik ya da elektromanyetikdir. Elektrostatik yöntemde uygulanan bir sıcaklık farkının çınlaç yapısında yaratacağı genleşme engellenerek bir ısı gerilme oluşturulur ve bu gerilme ile frekans ayarı yapılır [46, 47]. Elektrostatik yöntemde ise çınlaç yapısının üzerinde yaratılan elektrostatik yüklenme ve bunun sonucunda çınlacın etkin rijitliğinde oluşan değişimle frekans kayması gerçekleştirilir. Elektrostatik yöntemde göre daha sık uygulanmaktadır [48].

Elektrostatik tahrik ile gerçekleştirilen örnek bir çalışmada, bir nanotel çınlacın yanına yerleştirilen bir akort elektrodu vasıtasıyla DC olarak eğilmesi ve eğilme sayesinde etkin rijitliğinin değişmesi sağlanmıştır [49]. DC akort elektrodu ile AC tahrik elektrodunun yerleştirilmesine bağlı olarak etkin rijitlikte oluşacak artma veya azalma sayesinde çınlanım frekansı da artacak ya da azalacaktır. Enine (transverse) DC potansiyel uygulanarak yapılan frekans ayarı, dar bir frekans aralığında (örneğin 0.96 MHz cihaz için sadece 60 kHz) çalışmıştır. Bu uygulamanın iki dezavantajı bulunur: Uygulanan akort potansiyeliyle ortaya çıkan çınlanım frekansı ilişkisi doğrusal değildir -bu tür bir doğrusallık piezoelektrik eyleyicilerde rapor edilmektedir [50]-. Ayrıca artan akort potansiyeli ile beraber doğrusal olmayan çalışma moduna girer, daha düşük yer değiştirmelerde görülmeye başlar (Duffing denklemi) [51]. Dolayısıyla kullanılabilir doğrusal çalışma alanı kısıtlıdır. Aynı çalışmada eksenel gerilmeyle ilgili deneysel sonuç bulunmamaktadır. Bunun sebebinin, elektrostatik tahrik ile Si nanotelin yeterince çekilmesinin zorluğu olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde enine elektrostatik tahrik ile yapılmış frekans ayarı çalışmaları mevcuttur [52-54]. Bu çalışmalarda da salınım yapan çınlaç yapısına yakın bir geçit ile sağlanan elastik rijitleşme veya sığaya bağlı yumuşama söz konusudur. Aynı şekilde geçide uygulanan potansiyel ile ortaya çıkan frekans kayması arasındaki ilişki doğrusal değildir ve dar bant aralıklarında çalışılmaktadır.

Eksenel gerilme – eğilmenin tersine – tek bir potansiyel ve frekans kayması ilişkisi verir. Yapının eğikliği değişmeyeceği için enine sığa okuma ya da alan salımı düzeneklerinde, tahrik potansiyelinden bağımsız, öngörülebilir bir akort sağlar. Alan salımı düzeni kullanılarak, nanomekanik çınlaçların eksenel gerilmeye tabi tutulması ve bu sayede dar bir bant aralığında da olsa (75-80 MHz) frekans ayarı yapılması mümkün olmuştur [36]. Ne var ki bu tür çalışmalarda çok yüksek tahrik potansiyelleri (100-1000 V) kullanılır. Dar bant aralığı

ve yüksek tahrik potansiyelleri, bu tekniğin pratik kullanımını engeller. Benzer sebeplerden dolayı önceki çalışmalarda kullanılmadığı ve bu yüzden enine tahrikin tercih edildiği düşünülmektedir [49].

6. SONUÇ

Mekanik çınlaçlar, uzun bir tarihi süreç sonucunda günümüzdeki yüksek performanslarına ulaşmışlardır. Günlük kullanımda karşılaştığımız en başarılı salınmaçların temelinde mekanik bir çınlaç ve onun etrafında kurulmuş bir geri besleme döngüsü bulunur. Bu zamanlayıcı bileşenin (timing element) kritik rolü, içinde yer aldığı bütün elektronik sistem performansını etkilerken, telsiz haberleşme uygulamalarında da frekans referanslarının iyileşmesiyle uygulamalar gittikçe daha geniş bir yelpazeye yayılmıştır.

Mekanik çınlaçların yüzyıllar süren evrimi, bir yandan elektronik tümleştirme diğer yandan çınlaç boyutlarında devamlı bir küçülme ile beraber frekanslarda yükselme getirmiştir. Bu süreç, günümüzde nanomekanik çınlaçlarla devam etmektedir.

Nanomekanik çınlaçlarda akordun, harici elektronikten kaynaklanacak faz gürültüsünü en aza indirmek amacıyla aktif bir şekilde yapılması ve bunun için de en uygun tekniğin mekanik gerilme yaratılması olduğu açıktır. Mekanik gerilmelerin yaratılmasında yonga üzeri ve elektronik uyumlu en uygun çözüm, elektrostatik tahriktir. Ne var ki nanotel ya da nanotüp yapıları bu yöntemle eksenel gerilme uygulanması ancak çok yüksek potansiyellerde mümkün olmaktadır (100-1000 V) ve elde edilen bant genişliği buna rağmen sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle genel kabul gören çözüm, çınlacın eksenel yerine enine elektrostatik kuvvete tabi tutularak eğilmesi bu sayede yaratılacak mekanik gerilmelerin frekans ayarında kullanılmasıdır. Fakat bu yöntemle elde edilecek akort potansiyeli ve frekans kayması ilişkisi, potansiyelin mertebesine göre birkaç farklı şekil alır. Bant aralığı halen dardır ve doğrusal olmayan etkiler erken gözükmektedir. Bu yüzden geri beslemeli bir kontrol uygulaması için uygun değildir. Nanomekanik çınlaçların gelecekte ticari uygulamalarda kendisine yer edinebilmesi için yeni akort teknolojilerine ihtiyaç duyulacağı açıktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 112E058 sayılı ve “MEMS Tabanlı, Geniş Bant Aralığında Aktif Frekans Ayarlı Nanomekanik Çınlaç Geliştirilmesi” başlıklı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Berk Berkan Turgut ve Yasin Kılınç’a yardımları için teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Li, R. X., Gibble, K., Szymaniec, K.** 2011. “Improved Accuracy of the NPL-CsF2 Primary Frequency Standard: Evaluation of Distributed Cavity Phase and Microwave Lensing Frequency Shifts,” *Metrologia*, vol. 48, no: 5, pp. 283-289.
2. **Lam, C.S.** 2008. “A Review of the Recent Development of MEMS and Crystal Oscillators and Their Impacts on the Frequency Control Products Industry,” *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2-5 November, pp. 694-704.
3. **Abdelmoneum, M. A., Demirci, M. M., Lin, Y. W., Nguyen, C. T. C.** 2004. “Location-dependent Frequency Tuning of Vibrating Micromechanical Resonators via Laser Trimming,” *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, p. 272-279.
4. **Headrick, M. V.** 2012. “Origin and Evolution of the Anchor Clock Escapement,” *IEEE Control Systems Magazine*, April, pp.41-52.
5. **Büttner, J.** 2007. “The Pendulum as A Challenging Object in Early-Modern Mechanics,” *Mechanics and Natural Philosophy Before the Scientific Revolution*, Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 254, pp. 223-237.
6. **Machamer, P., Hepburn, B.** 2005. “Galileo and the Pendulum: Latching on to Time in The Pendulum,” *Scientific, Historical, Philosophical & Educational Perspectives*, ed. M. R. Matthews, C. F. Gauld, A. Stinner, pp. 99-113, Springer, Dordrecht, Holland.
7. **Drake, S.** 1978. *Galileo at Work*, Dover Publications, New York, USA.
8. **Sobel, D., Andrewes, W. J. H.** 2004. *Boylam, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları*, Ankara.
9. **Whitestone, S.** 2012. “Christian Huygens’ Lost and Forgotten Pamphlet of his Pendulum Invention,” *Annals of Science*, vol. 69, no. 1, pp. 91-104.
10. **Mahoney, M. S.** 2001. “Sketching Science in the Seventeenth Century,” *Symposium on Creativity: The Sketch in the Arts and Sciences*, 25 May, Institute for Advanced Study, Princeton, USA.
11. **Whitestone, S.** 2008. “The Identification and Attribution of Christiaan Huygens’ First Pendulum Clock,” *Antiquarian Horology*, vol. 31, no.2, pp. 201-222, December 2008.
12. **Nijhoff, M.** 1897. *Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens, Correspondance 1670-1675*, pp. 408-409, La Haye, France.
13. **Hall, A. R.** 1951. “Robert Hooke and Horology,” *Notes and Records of the Royal Society of London*, April 1951, vol. 8, no. 2, pp. 167-177.
14. **Johnson, R. A.** 1983. *Mechanical Filters in Electronics*, Wiley Series on Filters: Design, Manufacturing and Applications, John Wiley & Sons, New York, USA.
15. **Newell, W. E.** 1968. “Miniaturization of Tuning Forks,” *Science*, vol. 161, pp. 1320-1326.
16. **Nathanson, H. C., Wickstrom, R. A.** 1965. “A Resonant-gate Silicon Surface Transistor With High-Q band-pass Properties,” *Applied Physics Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 84-86.
17. **Nathanson, H. C., Wickstrom, R. A.** 1968. “Microelectronic Frequency Selective Apparatus with Vibratory Member and Means Responsive Thereto,” 26 December, U.S. Patent no. 3,413,573.
18. **Imerito, T.** 2008. “Innovation Chronicle: Two Wizards from Westinghouse,” *Pittsburgh TEQ*, no. 1.
19. **Nathanson, H. C., Newell, W. E., Wickstrom, R. A., Davis, J. Jr. R.** 1967. “The Resonant Gate Transistor,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, March, vol: ed-14, no:3, pp. 117-133.
20. **Alaca, B. E.** 2009. “Integration of One-dimensional Nanostructures With Microsystems: an Overview,” *International Materials Reviews*, vol: 54, no: 5, pp. 245-282.
21. **Aked, C. K.** 1971. “Electricity, Magnetism and Clocks,” *Journal of the Royal Naval Scientific Service*, vol: 26, no: 6, pp. 386-400.
22. **Thomson, A. G.** 1972. “The First Electric Clock,” *Gold Bulletin*, vol:5, no:3, pp. 65-66.
23. **Bain, A.** 1852. *A Short History of Electric Clocks*, Chapman and Hall, London, UK.
24. **Marrison, W. A.** 1948. “The Evolution of the Quartz Clock,” *The Bell System Technical Journal*, vol: 27, pp. 510-588.
25. **Webb, H. D.** 1933. “A Vacuum Tube Tuning Fork Drive, Using Forks of Several Different Frequencies,” *Proceedings of the Indiana Academy of Science*, vol: 42, pp. 199-203.
26. **Horton, J. W., Marrison, W. A.** 1928. “Precision Determination of Frequency,” *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol: 16, no:2, pp. 137-154.
27. **Stephens, C., Dennis, M.** 2000. “Engineering Time: Inventing the Electronic Wristwatch,” *British Journal for the History of Science*, vol: 33, pp. 477-497.
28. **Horowitz, P., Hill, W.** 1996. *The Art of Electronics*, Cambridge University Press, New York, USA.

29. **Hilbert, J. L.** 2008. "RF-MEMS for Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, pp. 68-74.
30. **Rako, P.** 2009. "Making Oscillator Selection Crystal Clear," *EDN*, no: 4, pp. 28-36.
31. **Williamson, J.** 2011. "An Overview of MEMS Based Timing Devices," *MEMS Investor Journal*, 7 May,
32. **Nguyen, C. T-C.** 2007. "MEMS Technology for Timing and Frequency Control," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol: 54, no: 2, pp. 251-270.
33. **Arkan, E. F., Sacchetto, D., Yildiz, I., Leblebici, Y., Alaca, B. E.** 2011. "Monolithic Integration of Si Nanowires With Metallic Electrodes: NEMS Resonator and Switch Applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol: 21, 125018.
34. **Hsu, W.T.** 2008. "Recent Progress in Silicon MEMS Oscillators," *Proceedings of 40th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, pp. 135-145.
35. **Gallacher, B. J., Hedley, J., Burdess, J. S., Harris, A. J., McNie, M. E.** 2003. "Multimodal Tuning of a Vibrating Ring Using Laser Ablation," *Journal of Mechanical Engineering Science C*, vol. 217, pp. 557-576.
36. **Jensen, K., Weldon, J., Garcia, H., Zettl, A.** 2007. "Nanotube Radio," *Nano Letters*, vol. 7, pp. 3508-3511.
37. **Kim, K., Jensen, K., Zettl, A.** 2009. "Tuning Nanoelectromechanical Resonators with Mass Migration," *Nano Letters*, vol: 9, no: 9, pp 3209-3213.
38. **Syms, R. R. A., Moore, D. F.** 1999. "Focused Ion Beam Tuning of in-Plane Vibrating Micromechanical Resonators," *Electronics Letters*, vol. 35, pp. 1277-1278.
39. **Courcimault, C. G., Allen, M. G.** 2005. "High-Q Mechanical Tuning of MEMS Resonators Using a Metal Deposition-Annealing Technique," *13th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems: Transducers 2005*, pp. 875-878.
40. **Chiao, M., Lin, L.** 2003. "Post-Packing Tuning of Microresonators by Pulsed Laser Deposition," *Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators: Transducers 2003*, pp. 1820-1823.
41. **Joachim, D., Lin, L.** 2003. "Characterization of Selective Polysilicon Deposition for MEMS Resonator Tuning," *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, pp. 193-200.
42. **Zalalutdinov, M., Ilic, B., Czaplowski, D., Zehnder, A., Craighead, H. G., Parpia, J. M.** 2000. "Frequency-tunable Micromechanical Oscillator," *Applied Physics Letters*, vol. 77, pp. 3287-3289.
43. **Purcell, S. T., Vincent, P., Journet, C., Binh, V. T.** 2002. "Tuning of Nanotube Mechanical Resonances by Electric Field Pulling," *Physical Review Letters*, vol. 89, 276103.
44. **Dai, M. D., Eom, K., Kim, C.W.** 2009. "Nanomechanical Mass Detection Using Nonlinear Oscillations," *Applied Physics Letters*, vol. 95, 203104.
45. **Verbridge, S. S., Shapiro, D. F., Craighead, H. G., Parpia, J. M.** 2007. "Macroscopic Tuning of Nanomechanics: Substrate Bending for Reversible Control of Frequency and Quality Factor of Nanostring Resonators," *Nano Letters*, vol. 7, pp. 1728-1735.
46. **Jun, S. C., Huang, X. M. H., Manolidis, M., Zorman, C. A., Mehregany, M., Hone, J.** 2006. "Electrothermal Tuning of Al-SiC Nanomechanical Resonators," *Nanotechnology*, vol. 17, pp. 1506-1511.
47. **Jun, S. C., Son, H., Baik, C. W., Kim, J. M., Moon, S. W., Kim, J. H., Huang, X. M. H., Hone, J.** 2008. "Electrothermal Noise Analysis in Frequency Tuning of Nanoresonators," *Solid-State Electronics*, vol. 52, pp. 1388-1393.
48. **Kwon, J., Choi, J., Kim, K., Sim, J.** 2009. "Frequency Mining of Nanowire Resonator Using Electrostatic Spring Effect," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol: 45, no: 5, pp. 2332-2335.
49. **Yao, J. J., MacDonald, N. C.** 1996. "A Micromachined, Single-Crystal Silicon," *Tunable Resonator*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, pp. 257-264.
50. **Masmanidis, S. C., Karabalin, R. B., Vlaminc, I. De, Borghs, G., Freeman, M. R., Roukes, M. L.** 2007. "Multifunctional Nanomechanical Systems via Tunably Coupled Piezoelectric Actuation," *Science*, vol. 317, pp. 780-783.
51. **Ekinci, K. L., Yang, Y. T., Roukes, M. L.** 2004. "Ultimate Limits to Inertial Mass Sensing Based upon Nanoelectromechanical Systems," *Journal of Applied Physics*, vol. 95, 2682.
52. **Sazanova, V., Yaish, Y., Üstünel, H., Roundy, D., Arias, T. A., McEuen, P. L.** 2004. "A Tunable Carbon Nanotube Electromechanical Oscillator," *Nature*, vol. 431, pp. 284-287.
53. **Eriksson, A., Lee, S., Sourab, A. A., Isacson, A., Kaunisto, R., Kinaret, J. M., Campbell, E. E. B.** 2008. "Direct Transmission Detection of Tunable Mechanical Resonance in an Individual Carbon Nanofiber Relay," *Nano Letters*, vol. 8, pp. 1224-1228.
54. **Fung, W. Y., Dattoli, E. N., Lu, W.** 2009. "Radio Frequency Nanowire Resonators and in Situ Frequency Tuning," *Applied Physics Letters*, vol. 94, 203104.