

ALÇAK SEVİYE RÜZGAR SHEARİ ALARM SİSTEMİ

Low Level Windshear Alert System

(LLWAS)

Yüksel YAĞAN

Meteoroloji Mühendisi

İbrahim ÇAMALAN

Meteoroloji Mühendisi

Ankara 2007

İÇİNDEKİLER

GİRİŞ

- 1- Rüzgar Sheari (Wind Shear)
- 2- Rüzgar Shearinin Oluşmasının Sebepleri
 - 2.1 Cephesel Durumlarda Meydana Gelen Rüzgar Shearları
 - 2.2 Konvektif Faaliyetler Sonucunda Meydana Gelen Rüzgar Shearları
 - 2.3 Arazinin Yapısından Dolayı Meydana Gelen Rüzgar Shearları
 - 2.4 Deniz ve Kara Melteminin (Sea Breeze) Etkisiyle Oluşan Rüzgar Shearları
- 3- Rüzgar Sheari Hesaplamaları
- 4- Alçak Seviye Rüzgar Sheari (Low-Level Wind Shear)
- 5- Alçak Seviye Rüzgar Shearinin Uçak Performansına Etkisi
 - 5.1 Rüzgar Shearinin Uçağın Hızına Olan Etkisi
 - 5.2 Kanat Ekseni ve Rüzgar Yönü Arasındaki Açığa (Angle of Attack) Rüzgar Shearinin
 - 5.3 Yan Rüzgar ve Yan Rüzgar Shearinin Uçağa Etkisi
 - 5.4 Özel Rüzgar Sheari Koşullarında Uçak Performansı
 - 5.4.1 Kafa ve Kuyruk Rüzgar Sheari
 - 5.4.2 Rüzgarın Düşey Bileşeninde Meydana Gelen Rüzgar Shearinin Uçaklara Etkisi (Yukarı ve Aşağı Doğru Hava Hareketi)
- 6- Alçak Seviye Rüzgar Sheari Ölçüm Yöntemleri
 - 6.1 Yer Gözlemleri
 - 6.1.1 Görerek Gözlem
 - 6.1.2 Uygun Meteorolojik Aletlerle Gözlem
 - 6.1.2.1 Anemometrelerle
 - 6.1.2.2 Sondaj Balon
 - 6.1.3 Yer Meteoroloji Radarı
 - 6.2 Meteorolojik Uydular ile Gözlem
 - 6.3 Rüzgar Sheari Tespiti ve Ölçüm için Kullanılan Özel Sistemler
 - 6.3.1 LLWAS
 - 6.3.2 Ses Dalgası Dedektörü ve Değişimi (SODAR)
 - 6.3.3 Doppler Radar
 - 6.3.3.1 D. Radar ile ölçülen rüzgar Sheari shear ile İlişkili Meteorolojik Hadiseler
 - 6.3.3.2 Radarların ölçtüğü radial rüzgar hızından hesaplanabilen shear değerleri
 - 6.3.3.3 Radial Shear Algoritması
 - 6.3.4 Doppler LIDAR
 - 6.3.4.1 LIDAR Çeşitleri
 - 6.3.5 Wind Profiler
 - 6.3.6 Terminal Doppler Hava Radarı (TDWR)
 - 6.4 Uçakta Tespit Edilmesi

GİRİŞ

Atmosferde meydana gelen meteorolojik olaylar daima insan hayatını ve yaşantısını direkt olarak etkilemiştir. Bu olayların gözlemlerinin ya da tahminlerinin yapılıp kullanıcılara sunulması ile zararlarını azaltılması veya sağlanacak faydanın artırılması mümkün olabilir. Bu olaylardan en önemlilerinden birisi de Rüzgar Sheari' dir.

Rüzgar Sheari; Atmosferde belirli iki nokta arasında rüzgarın hızında veya yönünde ya da her ikisinde meydana gelen ani değişiklikler olarak tanımlanabilir. Bu değişiklik yatay veya dikey olabilir.

Rüzgar Shearinin esas olarak önem arz ettiği sektör havacılıktır. Bu meteorolojik olay; meydana geldiği alanlarda daima uçuculuk için risk oluşturmaktadır. Özellikle Alçak seviyede meydana gelen Shear (Alçak Seviye Rüzgar Sheari) inişte, kalkışta ve pist boyunca uçaklar için tehlike oluşturmaktadır. Bu noktalarda meydana gelen shear; inişte, enerji kazanımı veya kaybına, ani irtifa değişikliklerine, pisti kaçırmaya neden olur. Kalkışta ise, yine çok ani irtifa değişikliklerine enerji kaybına ve kalkış zorluklarına neden olabilmektedir.

Dünya üzerinde meydana gelen havacılık kazalarının %22' sinin nedenini meteorolojik faktörler oluşturmaktadır. Bu oranın %44' ü ise rüzgara bağlı kazalardır. Ülkemizde meteorolojik nedenli kazaların oranı yaklaşık %10' dur (1955- 2004). Bu kazaların sonucu ölü sayısı ise 300' ün üzerindedir.

Rüzgar Sheari etkilerinin ve zararlarının azaltılması için havaalanlarına çeşitli sistemlerinin kurulup işletilmesi gerekmektedir. Bu sistemlerinin en başında da Alçak Seviye Rüzgar Sheari Uyarı Sistemi (LLWAS) gelmektedir. Havacılık sektörünün özellikle teknolojik olarak sürekli geliştiği, insan ve kargo taşımacılığında hava yolu kullanımının hızla arttığı günümüzde, havaalanlarının meteorolojik altyapı, sistemler ve teknolojik olarak da geliştirilmeleri gerekmektedir.

Yıllara Göre Havaalanlarımızdaki Yolcu ve Uçak Trafik (D.H.M.İ)

YIL	YOLCU TRAFİĞİ			UÇAK TRAFİĞİ		
	İçhat	Dışhat	Toplam	İçhat	Dışhat	Toplam
1995	10.347.528	17.419.851	27.767.379	169.018	179.431	348.449
1996	10.862.539	19.918.123	30.780.662	176.040	196.446	372.486
1997	12.413.720	21.982.614	34.396.334	197.103	206.711	403.814
1998	13.238.832	20.960.847	34.199.679	218.155	196.830	414.985
1999	12.931.771	17.079.887	30.011.658	213.078	175.628	388.706
2000	13.339.039	21.633.495	34.972.534	200.841	190.369	391.210
2001	10.057.808	23.562.640	33.620.448	167.500	206.002	373.502
2002	8.697.864	24.927.311	33.625.175	155.353	215.389	370.742
2003	9.125.298	25.141.870	34.267.168	154.201	214.193	368.394
2004	14.427.969	30.361.101	44.789.070	192.698	247.540	440.238
2005	19.954.918	34.582.322	54.537.240	256.380	277.316	533.696

1 Rüzgar Sheari (Wind Shear)

Rüzgar Sheari rüzgar yön ve hızında belirli bir mesafede meydana gelen değişiklik olarak tanımlanabilir. Buradaki mesafe rüzgar yön ve hızındaki değişimin olduğu en kısa mesafedir. Rüzgar Sheari temel olarak iki durumda incelenir. Birinci durum atmosferde yatay mesafede oluşan Rüzgar Shearidir. İkincisi de düşey mesafede meydana gelen Rüzgar Shearidir. Gerek düşey, gerekse yatay mesafede meydana gelen Rüzgar Sheari atmosferde herhangi bir yerdeki rüzgar alanının devamlılık etkisini ani bir şekilde sonlandırır ve başka bir rüzgar alanına geçişi sağlar ki bu etki makaslama etkisi (shearing effect) olarak tanımlanır. Bu durum düşey mesafede oluşan Rüzgar Sheari bakımından önemlidir ve havacılık için önemli bir tehlike kaynağıdır.

2. Rüzgar Shearinin Oluşmasının Sebepleri

Düşey Rüzgar Sheari'nin oluşmasında pek çok meteorolojik faktör rol oynar. Bu faktörlerin dayandığı temel atmosferdeki termal dengeyle ilgilidir. Örneğin sıcaklığın yükseklikle arttığı enversiyon tabakasında kuvvetli Rüzgar Sheari meydana gelebilir. Bundan başka sonsuz bir kararsızlık zonu olan cephesel sistemlerde, dar alanda oluşan kararsızlık bölgelerinde ve oraj durumunda Rüzgar Sheari oluşabilir.

2.1. Cephesel Durumlarda Meydana Gelen Rüzgar Shearları

Cephe yüzeyleri farklı karakterlere sahip iki hava kütleleri arasındaki süreksizlik olarak değerlendirilir. Burada cephe yüzeyinin ayırdığı hava kütlelerinin arasındaki fark açık bir şekilde Rüzgar Sheari oluşmasında rol oynar. Örneğin iki hava kütlesi arasındaki sıcaklık farkı buna bariz bir örnektir. Cephe yüzeyinin farklı iki tarafında yer alan hava kütlelerindeki sıcaklık farkı yoğunluk ve basınç farkını da beraberinde getirecek ve bunun bir sonucu olarak kuvvetli rüzgarlar oluşacaktır. Kuvvetli rüzgarların oluşması durumunda yer yüzeyinin etkisiyle özellikle alçak seviyelerde kuvvetli Rüzgar Shearları meydana gelecektir. Bununla birlikte soğuk cephesel kararsızlık ve kuvvetli konverjans alanları yükseklikle rüzgarın değişiminde önemli rol oynar.

2.2. Konvektif Faaliyetler Sonucunda Meydana Gelen Rüzgar Shearları

Atmosferde sıcaklığın yükseklikle hızlı bir şekilde azaldığı durumlarda (100 metrede 1 °C'ye yakın –süperadyabatik sıcaklık gradyan durumu-) kuvvetli kararsızlıklar meydana gelir. Böyle durumlarda genel hava hareketi yerden yukarı doğrudur (konverjans). Ancak kararsızlığın ileri aşamalarında oraj bulutları oluşur. Oraj bulutlarının tepe yüksekliği kararsızlığın şiddetine bağlı olarak tropopoz seviyesinin üzerine kadar çıkabilir. Böyle durumlarda hamle cephesi (gust front), microburst, downburst gibi hadiseler ortaya çıkabilir. Gust front microburst ve downburstten ayrı olarak değerlendirilmelidir. Rüzgar sheari bakımından microburst ve downburst öne çıkar her ikisinde de oraj bulutundan yere doğru bir akım (downdraft) mevcuttur. Bu durumun oluşmasında oraj bulutu içerisindeki termik ve fiziksel yapı ön plandadır, önemli rol oynar. Bütün bu olayların meydana geldiği durumlarda yükseklikle rüzgar önemli ölçüde değişiklik gösterir. Gerek bulut içi gerekse de bulut dışında kuvvetli kararsızlık ve oraj durumlarında türbülanslı akım ve bunun sonucu olarak kuvvetli Rüzgar Shearları meydana gelir. Pek çok havaalanında kararsızlıktan kaynaklanan Rüzgar Shearlarının sebep olduğu uçak kazaları gerçekleşmiştir.

2.3. Arazinin Yapısından Dolayı Meydana Gelen Rüzgar Shearları

Tek bir doğrultuda ve uzun süreli bir hava hareketi rüzgar bakımından farklı yapıda arazilerde değişik sonuçların doğmasına neden olabilmektedir. Burada arazinin yapısı ve deniz veya göl gibi su kütlelerine yakınlığı ön plana çıkmaktadır.

Dağlık bölgelerdeki arazilerde dağ ve vadi meltemleri (mountain, valley breeze) meydana gelebilir. Dağ ve vadi meltemlerinin etkisinin kuvvetli olmasında vadi tabanının derinliği ve dağ silsilesinin yüksekliği önemli rol oynamaktadır. Her iki meltem durumunda da yükselici ve çökmekte olan hava kütlelerinden söz edilebilmektedir. Termik yapının farklılık gösterdiği durumlarda dağ ve vadi meltemlerinin etkisi daha da artacak ve kuvvetli rüzgarların olmasına sebep olacaktır. Bütün bunların sonucunda sürtünmenin de etkisiyle yerden yukarı doğru rüzgar önemli değişiklikler gösterecektir. Bu durumda özellikle yere yakın seviyelerde kuvvetli Rüzgar Shearları beklenilebilir.

Dağlık bölgelerde dağ ve vadi meltemlerinin neden olduğu Rüzgar Shearlarının yanı sıra dağ dalgalarının sebep olduğu Rüzgar Shearlarine de sık sık rastlanılır. Dağ dalgası, dağ engeline çarpan hava akımlarının oluşturduğu atmosferik dalgalardır. Düzgün bir akımla (laminer akım) dağ engeline çarpan akımlar oldukça türbülanslı dalgaların oluşmasına neden olabilir. Bu durumda, yükselici ve alçalıcı hareketlenmelerin sonucu olarak hava parseli içerisindeki termik yapı da değişebilir. Sonuç olarak dağ seviyesinin hemen üzerinde ve yamaçlarda kuvvetli Rüzgar Shearlari oluşabilir.

Deniz seviyesinden oldukça yüksek, deniz etkisinden uzak düz ovalarda, platolarda gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farklılıkları büyüktür. Hatta gün içerisinde bile güneşlenmeden dolayı farklı sıcaklık değerleri oluşabilir. Bunun sonucunda hava yoğunluğunda ani ve farklı değişimler meydana gelir. Böylece mikro ölçekli basınç sistemleri oluşur ve bunun sonucunda kuvvetli rüzgarlar meydana gelir. Yer seviyesinde meydana gelen kuvvetli rüzgarlar sürtünme tabakasına doğru azalabilir ve bu etki kuvvetli Rüzgar Shearlarının oluşmasına sebep olabilir.

2.4. Deniz ve Kara Melteminin (Sea Breeze) Etkisiyle Oluşan Rüzgar Shearlari

Büyük su kütlelerine (deniz, büyük göl veya iç deniz) yakın kara bölgeleri üzerindeki rüzgarın gün içerisindeki salınımı oldukça çarpıcıdır. Bunun nedeni gün içerisinde kara ve deniz bölgelerinin farklı ısınıp soğumasıdır. Gündüz vakitlerinde karalar denizlere oranla daha çabuk ısınır. Bunun sonucu olarak deniz üzerindeki havanın yoğunluğu artar ve denizden karaya doğru oluşan yatay sıcaklık gradyanının etkisinde rüzgar denizden karaya doğru eser. Gece ise durum tam tersidir. Deniz melteminin hızı sıcaklık farkına bağlıdır. Tropikal bölgelerin dışında, deniz melteminin hızı 10 – 15 knot ve üzerine çıkabilir. Tropikal bölgelerde ise deniz meltemi çoğunlukla 20 knotun üzerindedir. Geceleri karadan denize doğru esen rüzgar ile deniz meltemi kıyaslandığında deniz melteminin çok daha etkin olduğu görülür. Kara ile deniz arasında yeteri kadar sıcaklık farkının olduğu gündüz vakitlerinde deniz meltemi kıyıda 30 km içerilere kadar sokulabilir. Böyle durumlarda deniz melteminin düşey atmosferdeki etkisi 350 – 400 metreyi bulabilir. Deniz melteminin bu şekilde kuvvetli olduğu durumlarda karadaki yüzey şekillerinin de etkisinde özellikle alt atmosferde şiddetli rüzgarla birlikte kuvvetli Rüzgar Shearlari oluşur.

Deniz melteminin diğerk bir etkisi de kıyı bölgelere yakın yerlerde deniz meltemi cephesinin (Sea Breeze Front) oluşmasıdır. Yeterli nemlilik ve sıcaklık farkının olduğu gündüz vakitlerinde deniz melteminin karaya doğru esmeye başlamasıyla kara üzerindeki sıcak ve nemli hava denizden gelen serin ve nemli havanın etkisiyle yükselir. Bu durumda denizden gelen soğuk havanın karadaki sıcak havanın altına girmesi yani soğuk hava kaması durumu söz konusudur. Böylece kara üzerindeki sıcak hava yükselir, konverjans alanları oluşur. Bu tipik bir oraj hücrelerinin gelişimi aşamasıdır. Kararsız bir durum söz konusudur. Yükselici faaliyetler oldukça kuvvetlidir ve bunun sonunda şiddetli Rüzgar Shearleri meydana gelir.

3. Rüzgar Sheari Hesaplamaları

Rüzgar Sheari hesabı, atmosferde rüzgar bilgileri elde edilmiş olan herhangi iki nokta arasındaki fark vektörü kullanılarak yapılır. Bu fark vektörü hem rüzgar yönü hem de rüzgar şiddeti değerlerini içerecek şekilde hesaplama yapılır. Hesaplama iki nokta arasındaki mesafe de dikkate alınır.

Örnek:

Yerden 500 feet yüksekliğindeki B noktasında rüzgar 220 dereceden 10 knot olsun. Yerden 1000 feet yükseklikteki A noktasında ise rüzgar 240 dereceden 30 knot olsun.

Bu durumda iki türlü Rüzgar Sheari hesabından bahsedilir. Birinci durumda yerden yukarıya doğru (B noktasından A noktasına yani uçak kalkarkenki durum) olan Rüzgar Sheari. İkinci durumda yukarıdan yere doğru (A noktasından B noktasına yani uçak inerkenki durum) olan Rüzgar Sheari.

Öncelikle herhangi bir rüzgar değerinin meteorolojik kartezyen koordinatlardaki vektör bileşenlerine ayrılması işlemini görelim:

Rüzgar değerinin doğu-batı bileşeni şu şekildedir:

$$u = \text{rüzgar hızı} (-\sin(\text{rüzgar yönü}))$$

Rüzgar değerinin kuzey-güney bileşeni şu şekildedir:

$v = \text{rüzgar hızı} (-\cos(\text{rüzgar yönü}))$

Tersi durumda, u ve v bileşenleri belli olan bir rüzgar değerinin hangi yönde estiğini bulabilmek için aşağıdaki formül kullanılır:

$$\text{YönFaktörü} = \arctan\left(\frac{v}{u}\right)$$

Burada u ve v 'ye göre eşitlik şu şekilde düzenlenir:

Eğer $u = 0$ ve $v < 0$ ise Rüzgar Yönü = 360 derecedir.

Eğer $u = 0$ ve $v > 0$ ise Rüzgar Yönü = 180 derecedir.

Eğer $u < 0$ ise Rüzgar Yönü = 270 – YönFaktörü olur.

Eğer $u > 0$ ise Rüzgar Yönü = 90 – YönFaktörü olur.

u ve v değerlerinin belli olması durumunda rüzgar hızı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$\text{Rüzgar Hızı} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Şimdi örneğimizdeki A ve B noktalarındaki rüzgar değerlerinin doğu - batı ve kuzey – güney bileşenlerini hesaplayalım.

A Noktası için doğu - batı bileşeni:

$$u = 30(-\sin(240)) = +26$$

B Noktası için doğu - batı bileşeni:

$$u = 10(-\sin(220)) = +6.4$$

A Noktası için kuzey – güney bileşeni:

$$v = 30(-\cos(240)) = +15$$

B Noktası için kuzey – güney bileşeni:

$$v = 10(-\cos(220)) = +7.7$$

A noktasından B noktasına doğru (uçağın iniş yönünde) olan Rüzgar Shearini şu şekilde hesaplayabiliriz:

doğu – batı bileşenleri vektör farkı, $u_{\text{shear}} = 26 - 6.4 = 19.6$

kuzey – güney bileşenleri vektör farkı, $v_{\text{shear}} = 15 - 7.7 = 7.3$

Şimdi u_{shear} ve v_{shear} değerlerini kullanarak Rüzgar Shearinin YönFaktörünü hesaplayalım:

$$\text{YönFaktörü}_{\text{shear}} = \arctan\left(\frac{7.3}{19.6}\right) = 20 \text{ çıkar.}$$

A noktasından B noktasına giderken $u_{\text{shear}} > 0$ olduğu için;

Rüzgar Yönü_{shear} = 90 – 20 = 70 derece çıkar.

$$\text{Rüzgar Hızı}_{\text{shear}} = \sqrt{19.6^2 + 7.3^2} = 21 \text{ knot'tur.}$$

Sonuç olarak A noktasından B noktasına gidilirken yani uçağın iniş yönündeki Rüzgar Shearinin değeri 70 dereceden 21 knottur.

Şimdi B noktasından A noktasına giderken yani uçağın kalkış yönündeki Rüzgar Shearini hesaplayalım.

doğu – batı bileşenleri vektör farkı, $u_{\text{shear}} = 6.4 - 26 = -19.6$

kuzey – güney bileşenleri vektör farkı, $v_{\text{shear}} = 7.7 - 15 = -7.3$

B noktasından A noktasına giderken $u_{\text{shear}} < 0$ olduğu için;

Rüzgar Yönü_{shear} = $270 - 20 = 250$ derece çıkar.

Sonuç olarak B noktasından A noktasına gidilirken yani uçağın kalkış yönündeki Rüzgar Shearinin değeri 250 dereceden 21 knottur.

Rüzgar Shearinin yüksekliğe göre hesabı için şu formül kullanılır:

$$\text{Rüzgar Sheari} = \left[(u - u_{-1})^2 + (v - v_{-1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (\Delta z)^{-1}$$

Buradaki Δz iki seviye arasındaki yükseklik farkıdır.

Rüzgar Sheari birimi olarak genellikle knot/100 feet ve birim saniyedeki rüzgar değişimi kullanılır. Örnekte bu değer 4.2 knot / 100 feet'tir.

4. Alçak Seviye Rüzgar Sheari (Low-Level Wind Shear)

Atmosferde Rüzgar Shearine her seviyede rastlanılabilir. Ancak Rüzgar Shearinin yerden itibaren 500 m (1600 feet) bir tabakada rastlanması uçak inişi ve kalkışı bakımından oldukça tehlikeli ve zarar vericidir. Yerden itibaren olan söz konusu tabakadaki Rüzgar Shearine Alçak Seviye Rüzgar Sheari (Low-Level Wind Shear) adı verilir.

5. Alçak Seviye Rüzgar Shearinin Uçak Performansına Etkisi

Alçak Seviye Rüzgar Shearinin uçakların performansına olan etkisini anlayabilmek için dengeli bir uçuş sırasında, uçağın üzerine etki eden bütün kuvvetlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu kuvvetler uçuşun temel prensiplerini teşkil eder Şekil 5.1. Söz konusu kuvvetler, motor etkisinde meydana gelen Motor İtme Kuvveti (Thrust), Uçağın Ağırlığı (Weight), Sürtünme Kuvveti (Drag) ve Havanın Kaldırma Kuvvetidir (Lift).

Uçuş söz konusu bu dört kuvvetin dengesinde meydana gelir. Güvenli ve dengeli bir uçuş için bu dört kuvvetin bir biri arasındaki dengenin tam olması zorunludur Şekil 5.1 (b). İvmesiz bir şekilde düzgün doğrusal bir hareketle tırmanan bir uçakta Thrust ile Weight arasında şu şekilde bir ilişki vardır: $W \sin \gamma$ Şekil 5.1. Tırmanma Açısı (γ) ile Thrust arasında doğrusal bir orantıdan söz edilebilir. Tırmanma açısının çok küçük olduğu durumlarda $\sin \gamma = \gamma$ olarak alınabilir. Olası bir tırmanma açısı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir (Şekil 5.1'deki 1. Denklem):

$$T = D + W \gamma$$
$$\gamma = \frac{T - D}{W}$$

Şekil 5.1 (c)'ye göre, ivmesiz düzgün doğrusal bir şekilde alçalan bir uçak için daha az Thrust'a gerek duyulacaktır. Bu kuvvetin denge denklemi Şekil 5.1'deki 5. denklemde verilmiştir.

5.1 Rüzgar Shearinin Uçağın Hızına Olan Etkisi

Uzun yıllar boyunca rüzgarın uçaklar üzerine olan etkisi pilotlar arasında önemli bir tartışma konusu olmuştur. Pilot eğitiminde ilk olarak rüzgarın sadece uçağın yere göre olan hızına (Ground Speed, GS) ve süzölmeye (drift) olan etkisi öğretilmektedir. Rüzgarın uçak üzerindeki bütün etkisi söz konusu iki durumla sınırlı kalmadığı için, bu alanda pek çok kafa karışıklığı yaşanmaktadır. Bu da Rüzgar Shearinin uçak üzerine olan etkisinin anlaşılmasında büyük zorlukların yaşanmasına neden olmaktadır. Rüzgarın GS ve drift'e olan etkisinin Rüzgar Sheari durumunda daha iyi anlaşılabilmesi için, rüzgardaki ani ve önemli değişikliğin hesaba katılması Rüzgar Shearinin uçaklara olan etkisini daha iyi anlaşılabilir kılacaktır.

Laminer akışın olduğu durumlarda ve rüzgarın tedrici olarak değiştiği durumlarda rüzgarın uçak hızına etki etmediği aşağıdaki eşitlik ile doğrulanır.

$$GS = \text{Uçağın Gösterge Hızı (True Airspeed, TAS)} \pm \text{Uçağa Etki Eden Rüzgar Hızı (Wind)}$$

Rüzgar Sheari koşullarında uçakların inişinde ve kalkışında, kafa rüzgarı (headwind) ve kuyruk rüzgarı (tailwind) çok kısa mesafede önemli değişiklikler gösterecektir. Rüzgar Shearine maruz kalan bir uçakta, kafa ve kuyruk rüzgarı hızla değişiklik gösterdiği için eylemsizlik hareketi meydana gelecektir. Bu durumda uçak ne hızlanabilecek ne de yavaşlayabilecektir. Aynı zamanda uçak kendi orijinal hızını da koruyamayacak ve sadece rüzgar hızına göre hareketini sürdürecektir. Bu çok tehlikeli bir durumdur çünkü uçağa etki eden kuvvetlerin dengesi önemli ölçüde bozulacaktır.

Şimdi GS'yi çeşitli durumlar için irdeleyelim;

140 knot GS olduğu durumda rüzgarın olmadığını farz edersek eşitlik şu şekilde yazılır:

$$140 \text{ knot (GS)} = 140 \text{ knot (TAS)} - 0 \text{ (Wind)}$$

Kafa rüzgarında 20 knot'luk tedrici (yavaş yavaş) bir değişikliğin olduğunu farz edelim bu durumda eşitlik şu şekilde yazılır:

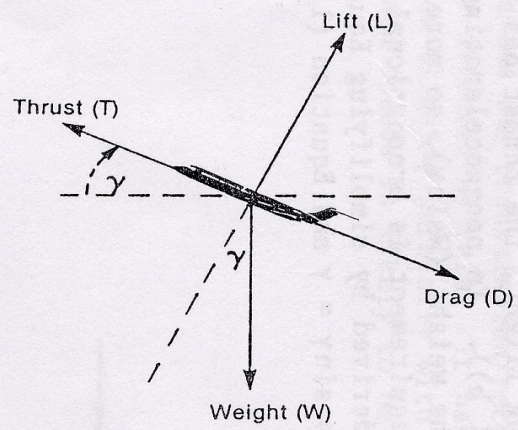
$$120 \text{ knot (GS)} = 140 \text{ knot (TAS)} - 20 \text{ knot (Wind)}$$

GS rüzgarın durumu dikkate alınmak suretiyle ayarlanır ve böyle durumlarda TAS'in herhangi bir etkisinden söz edilemez. Birinci durumda tedrici bir değişiklik için denklem yazılmıştır şimdi kafa rüzgarında 20 knot'luk hızlı değişikliğin olduğunu varsayalım yukarıdaki denklem bu durumda şu şekilde yazılır:

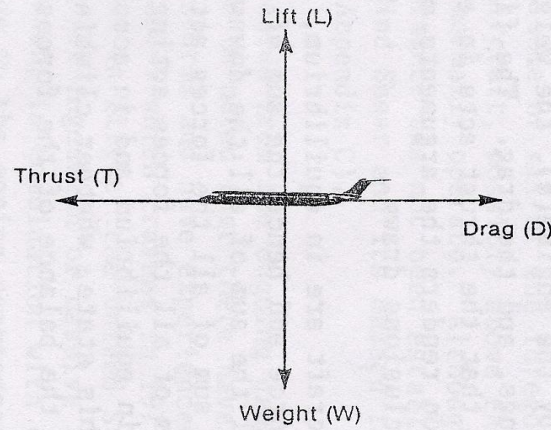
$$140 \text{ knot (GS)} = 160 \text{ knot (TAS)} - 20 \text{ knot (Wind)}$$

Uçak dengesini sağladığında ve düzgün bir şekilde seyrettiğinde kafa rüzgarının etkisi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

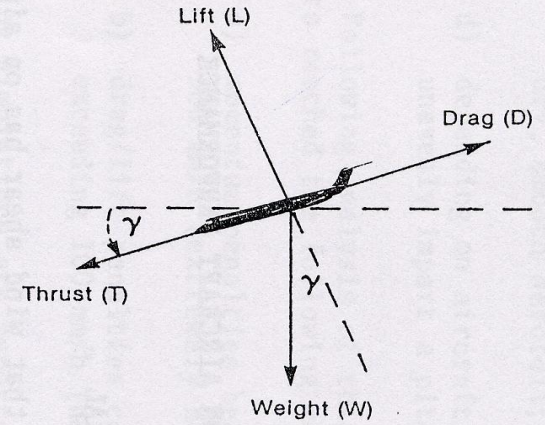
$$120 \text{ knot (GS)} = 140 \text{ knot (TAS)} - 20 \text{ knot (Wind)}$$



a) Climb



b) Level flight



c) Descent

Notes.— 1) Assuming steady, unaccelerated flight, and thrust acting along flight path,
 2) Assuming angle of climb or descent is γ ,
 3) Resolve forces normal to and parallel to the flight path:

$$T = D + W \sin \gamma \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$L = W \cos \gamma \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$T = D \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$L = W \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$T + W \sin \gamma = D \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$L = W \cos \gamma \quad \dots \dots \dots (6)$$

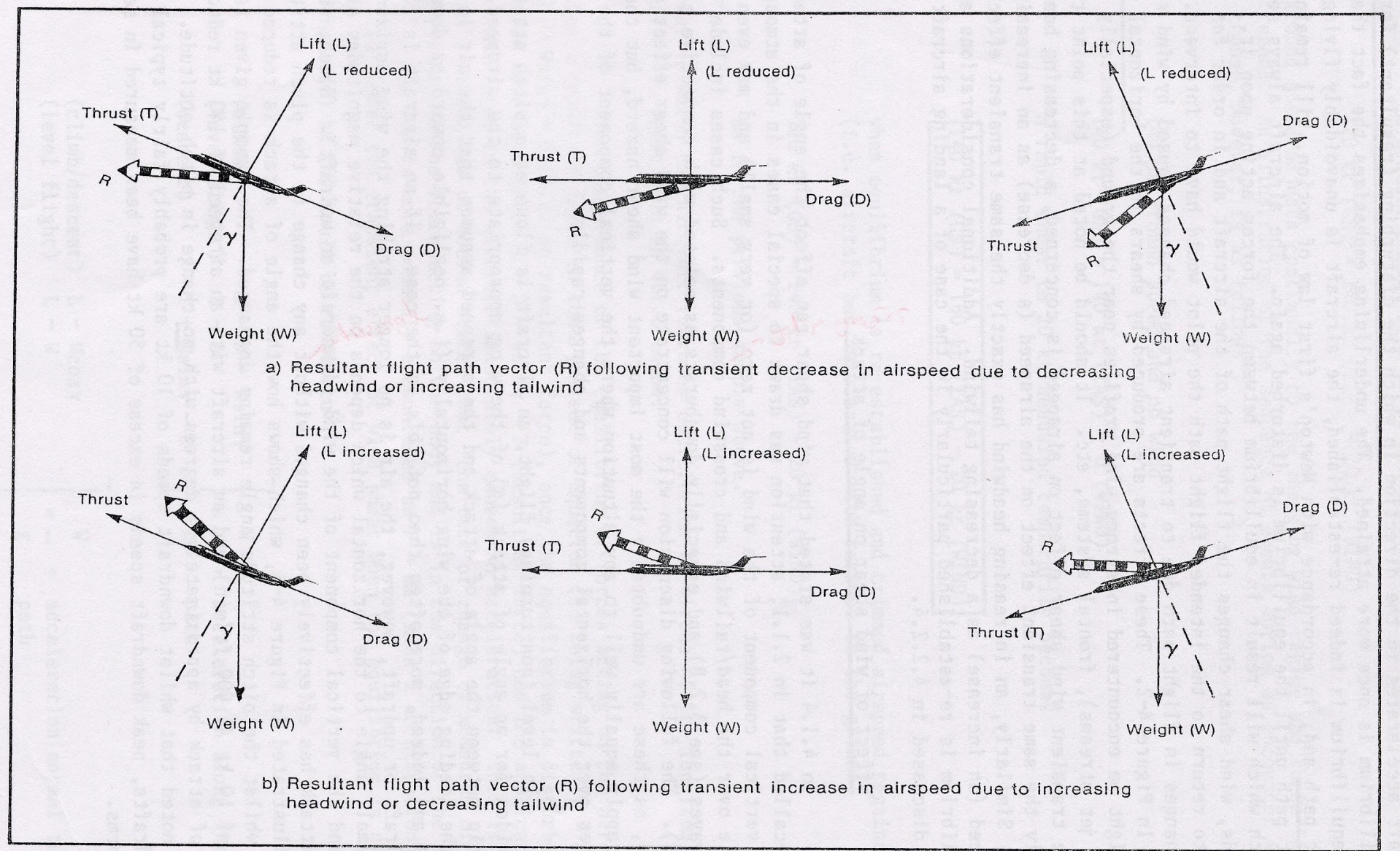
Şekil 5.1 Uçak Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Aralarındaki Matematiksel İlişkiler.

Uçak düzgün bir şekilde hızlanmasına devam ederken olası bir rüzgar etkisi uçağın üzerine etkiyen kuvvetlerin bileşke vektörünü değiştirecektir. Uçak yoluna rüzgar etkisinde meydana gelen bu yeni bileşke vektörün yönünde ve hızında devam edecektir. Önemli olan olası rüzgar değişiminin hesaba katılarak yeni bileşke vektörünün hesaplanmasıdır. İyi hesaplanmış bir bileşke vektörü rüzgar etkisinin yok olmasını ve uçağın dengeli bir şekilde hareket etmesini sağlar. Cephesel sistemlerin etkili olduğu hava koşullarında, alçak seviyede jet akımlarının olduğu durumlarda, kararsız hava koşullarında ve coğrafi etkilerle meydana gelen Rüzgar Sheari durumlarında mutlaka yeni bileşke hareket yönü doğru bir şekilde belirlenmelidir. Bileşke vektörünün belirlenmesinde kafa ve kuyruk rüzgarının durumu temel girdi verisidir. Bu değerlerin yükseliyor veya düşüyor olması bileşke üzerinde belirleyicidir. Şekil 5.2’de kuyruk ve kafa rüzgarının çeşitli durumları için uçağın sahip olacağı yeni bileşke vektör durumları gösterilmektedir.

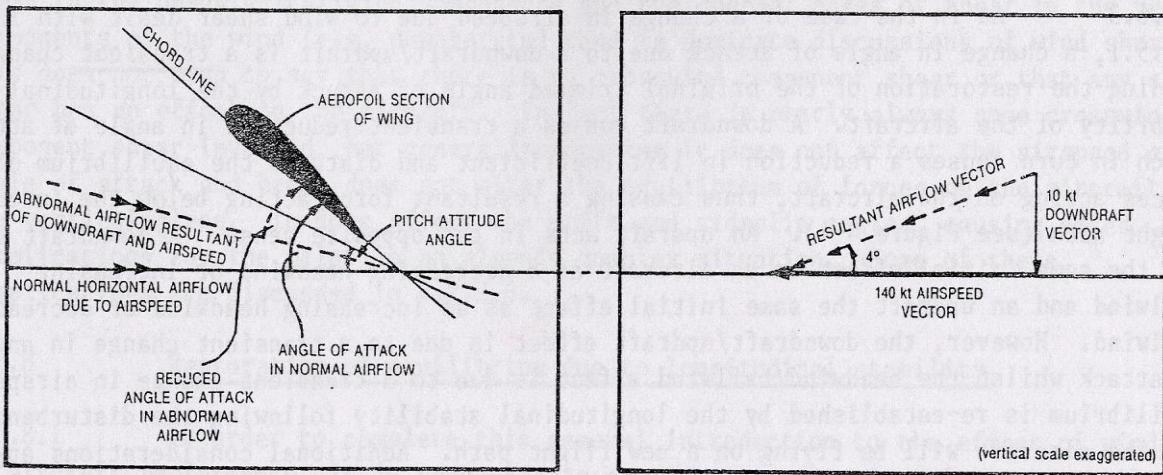
5.2 Kanat Ekseni ve Rüzgar Yönü Arasındaki Açıya (Angle of Attack) Rüzgar Shearinin Etkisi

Uçak motor gücünün etkisindeyken ve havada süzülme esnasında kanat eksenine, kanada gelen rüzgar yönü arasında bir açı oluşur. Bu açıya İngilizce’de “Angle of Attack” açısı adı verilir (Şekil 5.3). Bu açı literatürde α ile gösterilir. α açısına rüzgarın düşey bileşeni etki eder ve bu bileşen, cephe ve konvektif gelişmelerin olduğu kararsız hava koşulları durumunda çok önemlidir. Özellikle yere doğru kuvvetli hava akımlarının olduğu downburst durumunda oluşan kuvvetli Rüzgar Sheari α açısı üzerinde oldukça etkilidir.

Kalkış esnasında (pitch attitude) uçak kanat eksenine ile yatay zemin arasındaki açı “pitch attitude” açısı olarak adlandırılır. Ancak bu durumda rüzgarın etkisiyle α (angle of attack) açısı meydana gelir. Uçak yukarı ve aşağı doğru hava akımlarının olduğu durumlarda uçuyorsa, kanatlara çarpan rüzgarın düşey vektörü ve uçak hızına bağlı olarak arada küçük bir açı oluşur. İşte bu açı α üzerinde etkilidir. Kalkış açısı (pitch attitude) değişirse bile bu etkiyle α açısı değişecektir. Bu değişim yukarı veya aşağı doğru olan hava akımının şiddetiyle doğru orantılı olacaktır. Şekil 5.3 a’da α açısı, pitch attitude, düşey bileşeninin rüzgarın sapma etkisi görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 5.3’te yere doğru bir hava akımı durumunda α açısının nasıl düşüş gösterdiği bir örnekle açıklanmıştır.

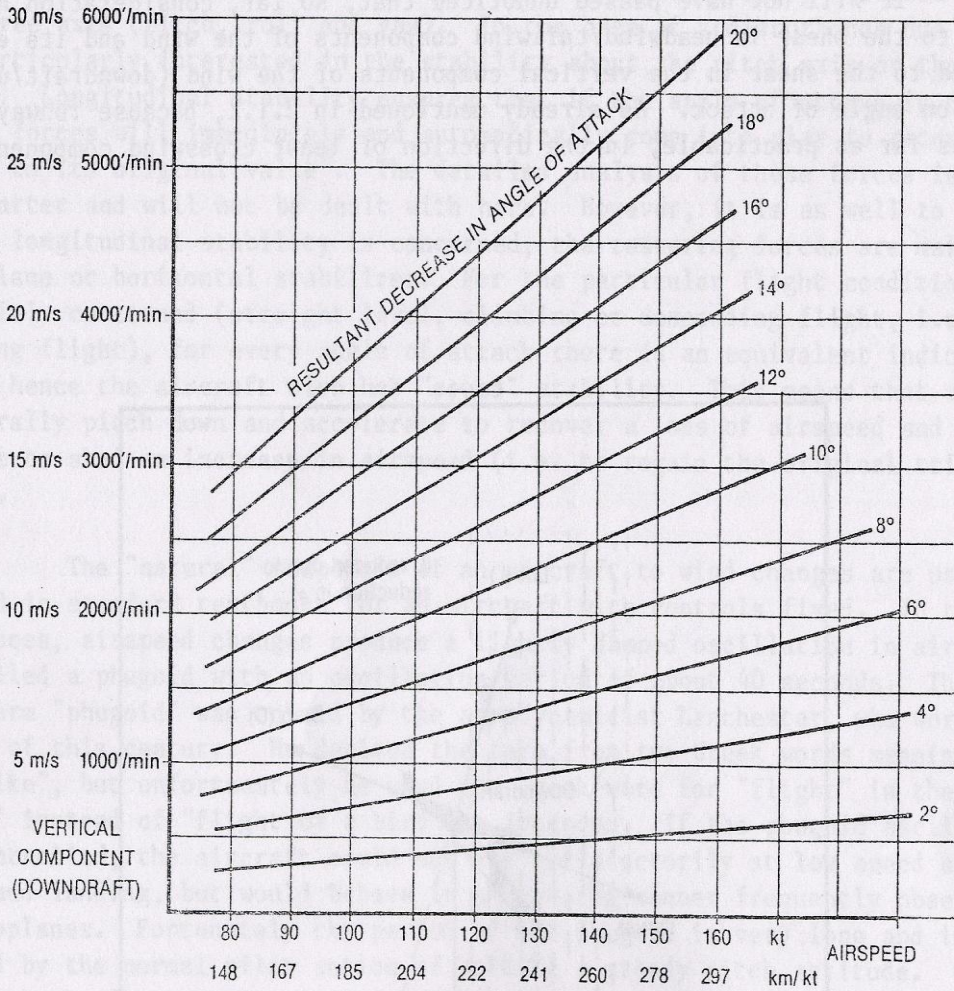


Şekil 5.2 Rüzgar Etkisinde Meydana Gelen Uçağın Bileşke Hareket Vektörleri



a) Angle of attack reduced due to downdraft but pitch attitude angle remains unchanged

b) 4° reduction in angle of attack due to 10 kt downdraft at airspeed of 140 kt

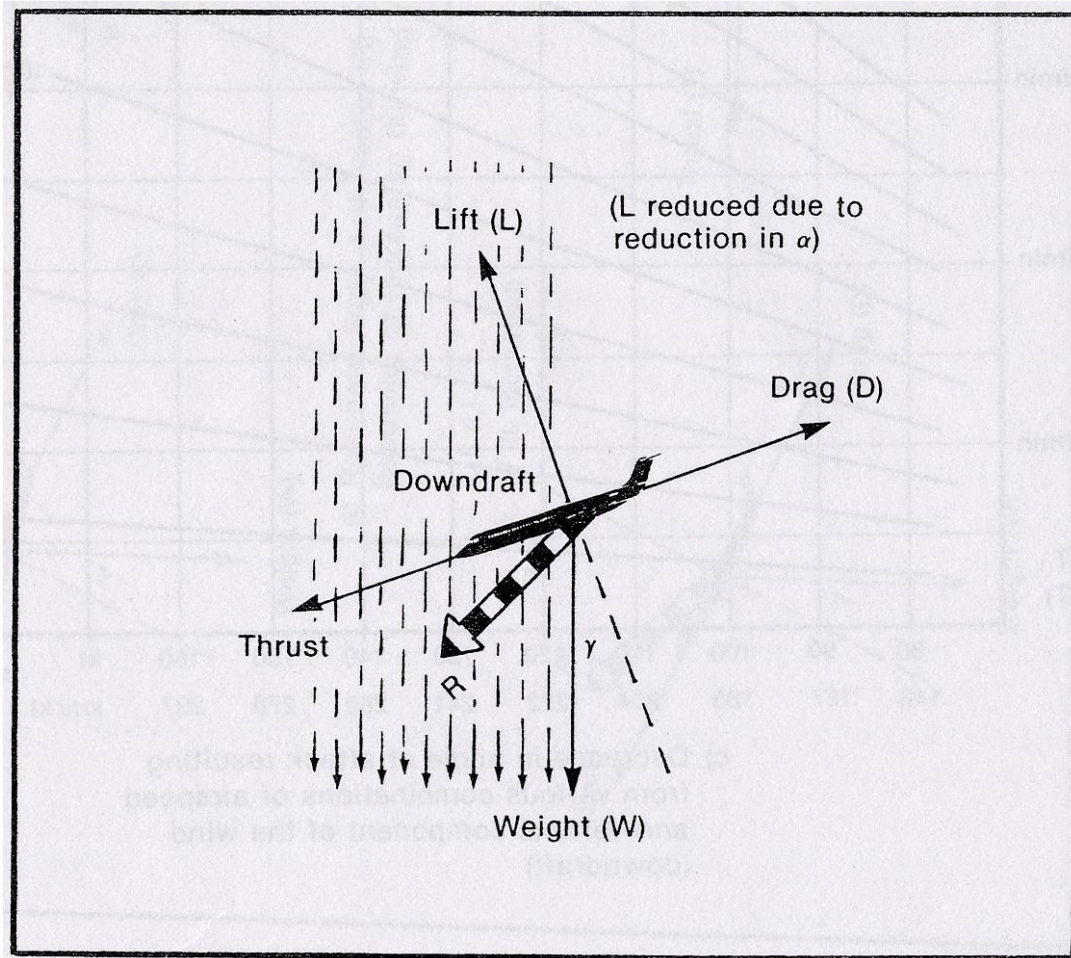


c) Decrease in angle of attack resulting from various combinations of airspeed and vertical component of the wind (downdraft)

Şekil 5.3 Aşağı Doğru Hava Hareketinde (Downdraft) α Açısının Değişimi

Şekil 5.3 b'de aşağı doğru hava akımlarının 10 knot (downdraft) olduğu ve uçağın hızının 140 knot olduğu bir andaki α açısındaki azalma vektörel olarak çizilmiştir. Yine Şekil 5.3 c'de uçak hızı ve aşağı doğru hareketin (downdraft) limit değerlerine bağlı olarak α açısındaki azalmayı gösteren grafik görülmektedir. Örnekte de açıklandığı gibi 10 knot'luk bir aşağı doğru harekette 140 knot hızla giden bir uçakta α açısındaki azalma 4 derecedir.

Yukarı veya aşağı doğru olan hava hareketliliğinde α açısındaki ani değişiklik uçağın kararlı bir şekilde uçuşunu etkileyecek ve uçağın dengesi bozulacaktır. α açısını bozan koşullarda uçağın dengesini yeniden sağlamak zor olacaktır. Sürekli dengenin bozulması da kaza anlamına gelmektedir. Aşağıya doğru olan hava hareketinde (downdraft) α açısındaki azalma çok daha önemlidir. Kuvvetli bir downdraft durumunda herhangi bir uçağın sahip olabileceği bileşke vektörün yönü Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Aşağı Doğru Kuvvetli Hava Hareketinde (Downdraft)
Uçağın Bileşke Hareket Vektörü

5.3 Yan Rüzgar ve Yan Rüzgar Shearinin Uçağa Etkisi

Genel bir özetleme yapılacak olursa, bir uçağın hızına etki eden rüzgar ve buna bağlı olarak Rüzgar Sheari, kafa, kuyruk rüzgarı ve yukarı aşağı yönde olan düşey hızdır. Ayrıca söz konusu rüzgar parametreleri “angel of attack” a da etki eder.

Yukarıda bahsedilen rüzgar parametrelerine yan rüzgar da (crosswind) eklenebilir. Yan rüzgar, uçağın hareket eksenine belirli bir açı yapan rüzgar olarak tarif edilebilir. Yan rüzgarın uçağa yaptığı açı uçak hareket eksenine yaptığı açının dikliğiyle orantılıdır. Pistler, uçak inişte ve kalkışta yan rüzgara en az mazur kalacak şekilde yapılır. Ancak bu durum uçağa inişte ve kalkışta şiddetli yan rüzgarların etki etmeyeceği anlamına gelmez. Uçaklar vektörel olarak yan rüzgarın etkinliğini hesaba kattıkları için genel olarak yan rüzgarın etkisi en az olarak değerlendirilir. Yan rüzgar, uçağın sürüklenmeye maruz kaldığı durumlarda ve yana doğru kaymaya meylettiği durumlarda önemlidir ve hesaba katılmalıdır.

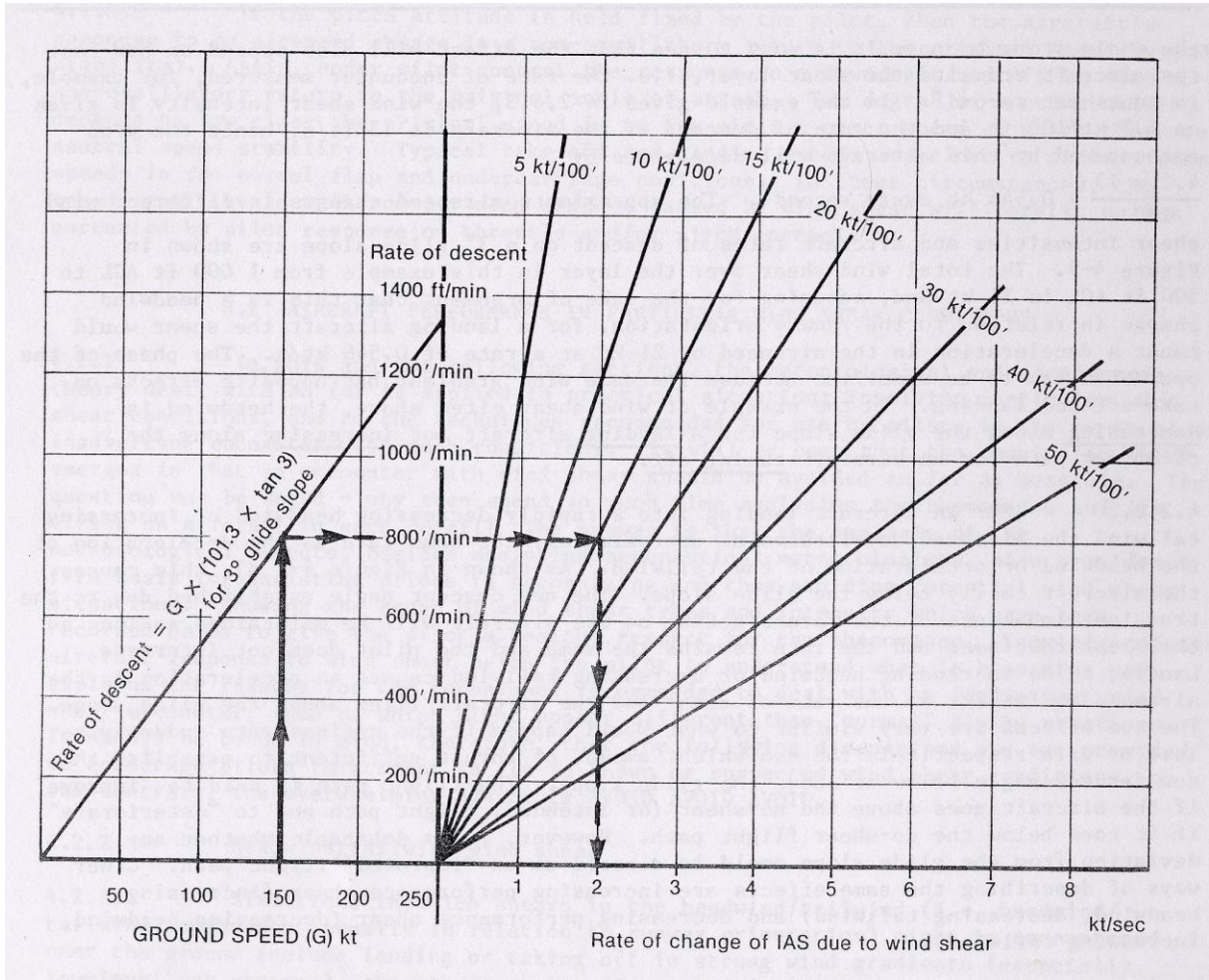
5.4 Özel Rüzgar Sheari Koşullarında Uçak Performansı

Bu bölümde, özel Rüzgar Sheari koşullarındaki meteorolojik ve aerodinamik teorilerin uygulamalarından bahsedilmiştir. Rüzgar Sheari, havacılıkta kaçınılması gereken fenomenlerden en önde gelenlerinden biridir. Bu yüzden gerektiği gibi analiz edilip sonuçlarının iyi bir şekilde değerlendirilmelidir. Rüzgar Shearinin etkisinin ve etkilendiği alanın bilinmesi güvenli bir uçuş için önemlidir.

5.4.1 Kafa ve Kuyruk Rüzgar Sheari

Havaalanı civarında oraj olduğu, alçak seviyede kuvvetli rüzgarların olduğu ve cephe geçişi gibi durumların olduğu zamanlarda uçakların kafa ve kuyruk rüzgarlarında mesafeyle ve yükseklikle değişimler varsa, uçak, iniş ve kalkışta kuvvetli Rüzgar Shearine maruz kalabilir. Böyle durumlarda yer seviyesine yakın seviyelerde uçağa etki eden kuvvetli Rüzgar Sheari orajla ilgilidir. Orajın neden olduğu hamle cephesi, aşağı doğru hava hareketi, microburst ve downburst gibi meteorolojik olaylar Rüzgar Shearinin ana sebebidir.

Uçağın Rüzgar Shearine maruz kaldığı andaki hız değişimi uçağın hızına ve Rüzgar Shearinin büyüklüğüne bağlıdır. 3. Bölümdeki örnekte uçak A (1000 feet) noktasından B (500 feet) noktasına doğru inişe geçerken maruz kaldığı Rüzgar Sheari, 4.2 knot/100 feet'tir. Uçağın iniş hızı 13 feet/saniye olduğu durumda uçağın birim zamandaki yavaşlama hızı şu şekilde hesaplanır: $4.2 \times 13 / 100 = 0.546$ knot / saniye. Herhangi bir uçağın 3 derecelik açıyla yaklaştığı (veya inişe geçtiği) sırada Rüzgar Shearinin farklı değerleri için uçağın hızındaki azalma oranı Şekil 5.5'te görülmektedir. Uçağın kalkış durumunda (B noktasından A noktasına gidiş) Rüzgar Shearinin etkisi bu sefer ters yönde olacaktır. Örnekte uçağın kafa rüzgarı azalıyor. Ancak kalkışta kafa rüzgarı aynı oranda artar.



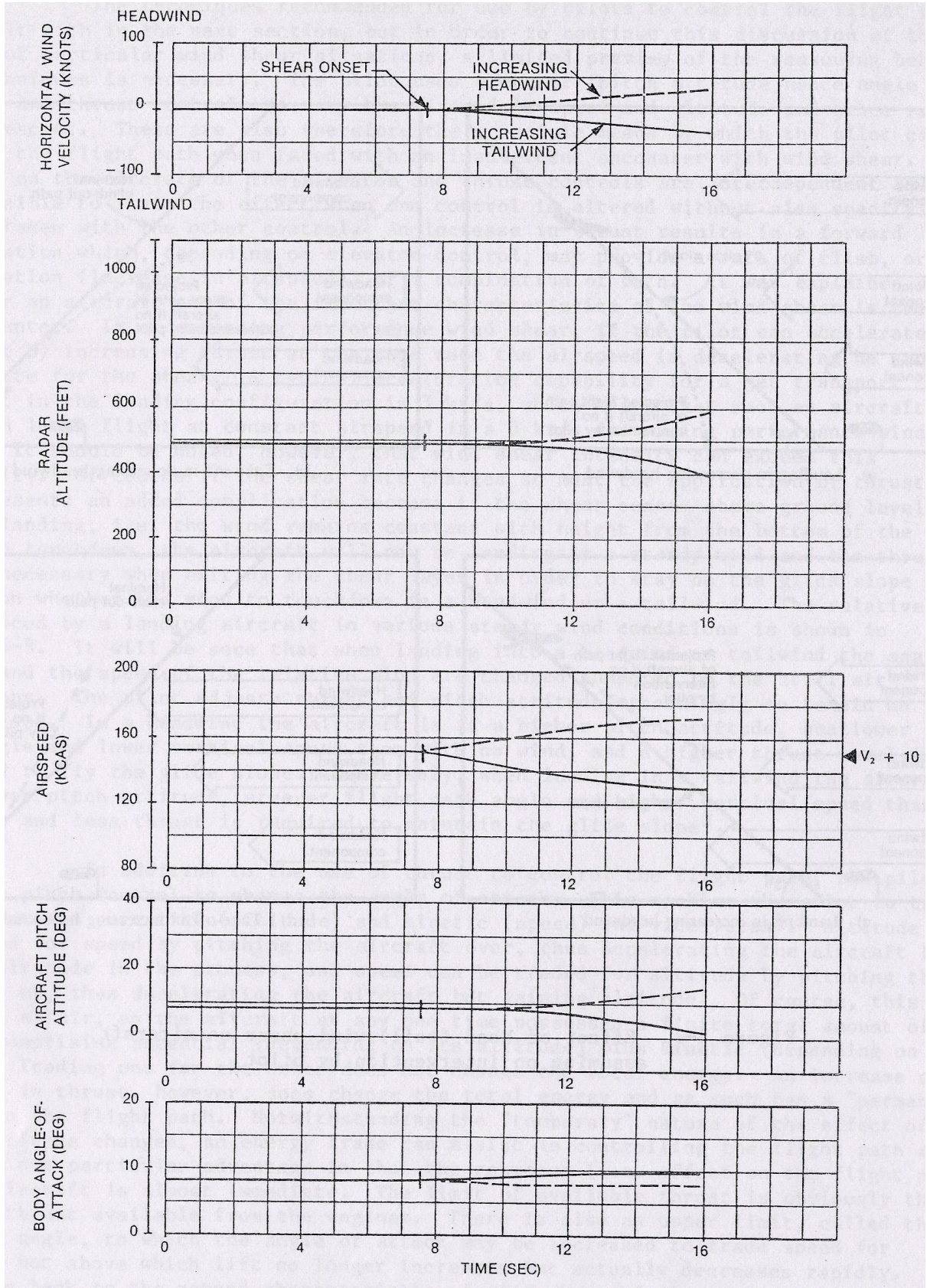
Şekil 5.5 Rüzgar Shearinin Farklı Değerleri İçin Uçağın Hızındaki Azalma Oranı

Uçak inişe geçtiği sırada kafa rüzgarında ani ve hızlı bir düşüş varsa veya kuyruk rüzgarında ani bir artma söz konusu ise bu durumda uçağın hızı kafa rüzgarının hızıyla aynı oranda düşüş gösterir. Ayrıca söz konusu durumda uçağın hızındaki düşüş kuyruk rüzgarının yaratmış olduğu ivmeyle de orantılıdır. Şekil 5.2 a'da görülebileceği gibi inişe geçmiş bir uçağın hızında ani düşüş olduğunda uçağın iniş eğimi aniden artar. Uçağın iniş açısındaki ani değişiklik dengesiz kuvvetlerin etkisinde ve rasgele olacaktır. Yere doğru kuvvetli Rüzgar Sheari koşulları devamlılık gösteriyorsa uçağın dengesi bozulacak ve pilotun uçağı kontrol edemeyecektir.

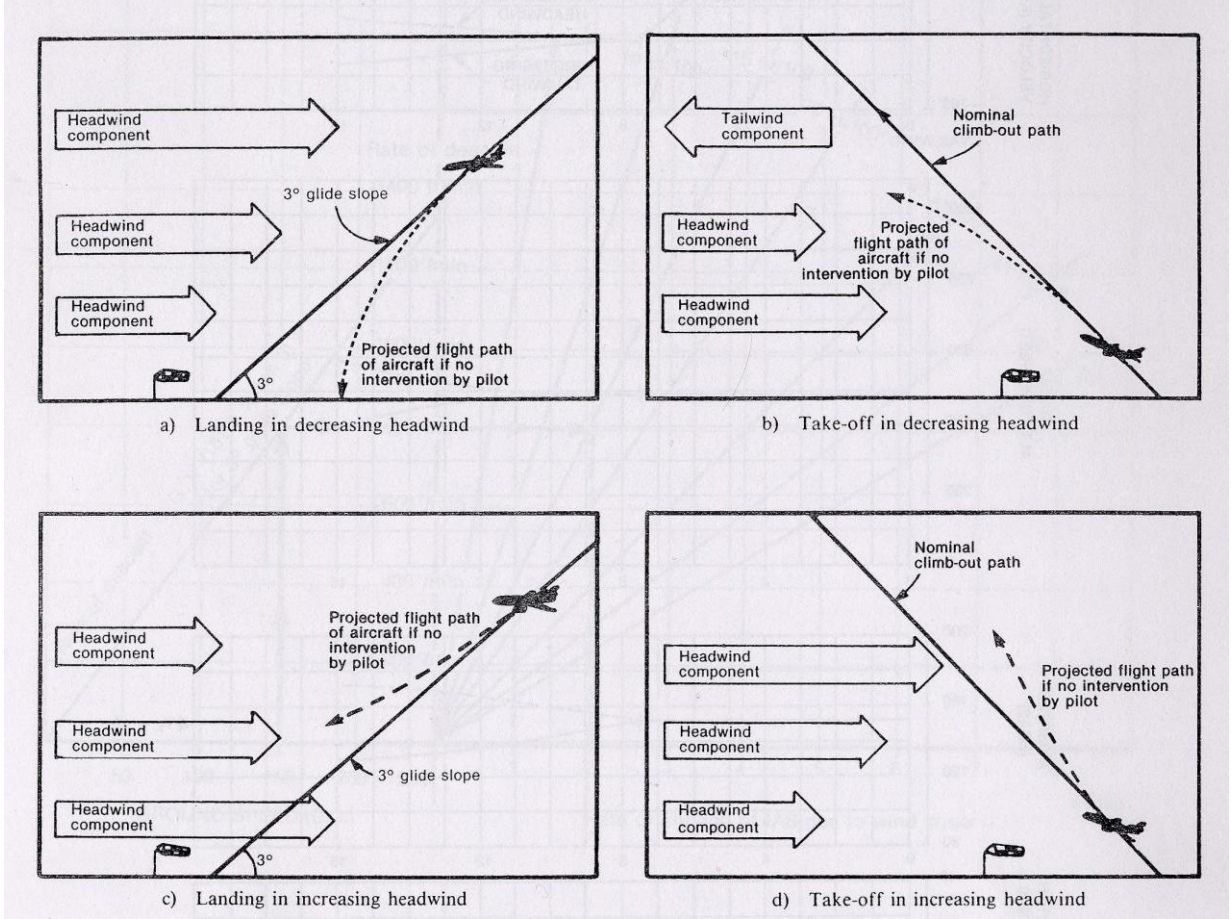
Yukarıdaki durumun tersine, uçak inişe geçtiği sırada kafa rüzgarında ani ve hızlı bir yükseliş varsa veya kuyruk rüzgarında ani bir düşüş varsa böyle durumda uçak aniden hızlanır. Sonuçta uçağın iniş açısı aniden artar ve uçağın kafası yukarı doğru dikilebilir. Bu durum Şekil 5.2 b'de gösterilmiştir.

Yukarıda anlatılan her iki durumda inişe geçmiş bir uçak için benzer sonuçların doğmasına neden olur. Uçağın motorunda üretilen güç her iki durumda da dengeyi sağlayamayabilir veya gerekli güç üretilemeyebilir. Uçağın yere doğru iniş eğiminin arttı durumda bu çok daha önemlidir. Sonuç olarak uçağa etkileyen kuvvetlerin dengelenmesi çok zordur ve uçağın dengesi aniden çarpıcı bir şekilde bozulabilir.

Uçak Rüzgar Shearinin etkisine girdiğinde bu pilotun uçağı kontrol ettiği yerde bulunan göstergelerden kolaylıkla anlaşılabilir. Göstergelerden olayın izlenebilirlik durumu Rüzgar Shearinin şiddetine, görüldüğü alana ve uçağın içinde bulunduğu genel duruma bağlıdır. Uçağın yerden belirli bir seviyeye kadar uzanan Rüzgar Shearinin etkisine girmesi art arda meydana gelen shear etkisi yaratır. Bu durumda uçağın kontrol edilebilmesi önemlidir. Devamlı bir şekilde shear etkisine maruz kalan bir uçağın hızı ani ve beklenmedik bir şekilde değişir. Bu değişiklik Rüzgar Shearinin başladığı noktadan itibaren kolaylıkla görülebilir. Şekil 5.6'da kafa ve kuyruk rüzgarının artmasıyla birlikte meydana gelen Rüzgar Shearinin, uçağın irtifasına, hızına, pitch attitude açısının değişimine ve angle of attack'ın yaptığı fiziksel etki kolaylıkla görülebilmektedir. Şekil 5.7'de ise kalkış ve iniş sırasında kafa ve kuyruk rüzgarındaki artma ve azalmaya bağlı olarak meydana gelen Rüzgar Shearinin uçağa olan etkisi görülmektedir.



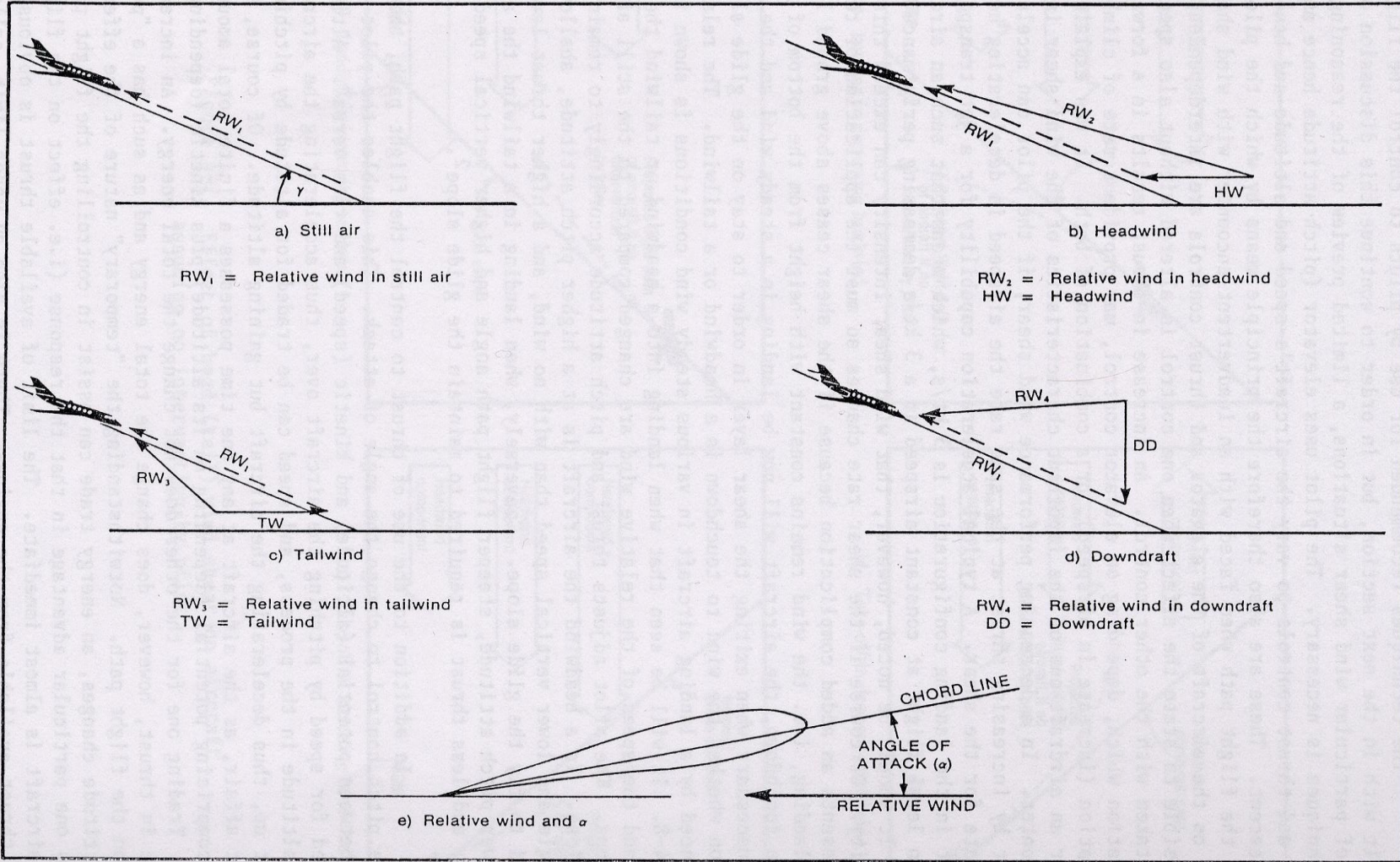
Şekil 5.6 Rüzgar Shearinin Çeşitli Uçuş Parametrelerine Etkisi



Şekil 5.7 Rüzgar Shearinin Kalkış ve İniş Sırasında Uçağa Etkisi

Kafa rüzgarının azaldığı (buna bağlı olarak kuyruk rüzgarının arttığı) durumlarda uçağın dengesinin sağlanabilmesi için pilotun hızı azaltması gerekir. Ancak kalkış ve iniş sırasında veya uçağın herhangi bir engelle karşılaşması durumunda hız azaltma işlemi çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Burada Rüzgar Shearinin etkisi de hesaba katılmalıdır. Bu yüzden yer ve yerin hemen üzerinde meydana gelen Rüzgar Shearinin çok daha önceden hesaba katılması ve buna göre tedrici bir şekilde hız azaltma işleminin yapılması en doğru sonucu verecektir.

Uçuş yolunun Rüzgar Sheari durumunda sağlıklı bir şekilde korunabilmesi için pilotlar çeşitli önlemler alırlar. Bunların en başında pilotun, kalkış ve iniş esnasında Rüzgar Sheari etkisine maruz kalan bir uçağı çeşitli hızlarda yavaşça irtifa kazandırmasıdır. Bu durumda uçağın baş tarafı hafifçe yükselecektir. Bununla birlikte, pilot uçağın itme gücünü ustaca kullanabilmelidir. Bu tedbir ani bir şekilde ortaya çıkan Rüzgar Shearinin etkisini azaltmada oldukça yararlı olacaktır. Örneğin Rüzgar Shearinin uçağın performansını olumsuz



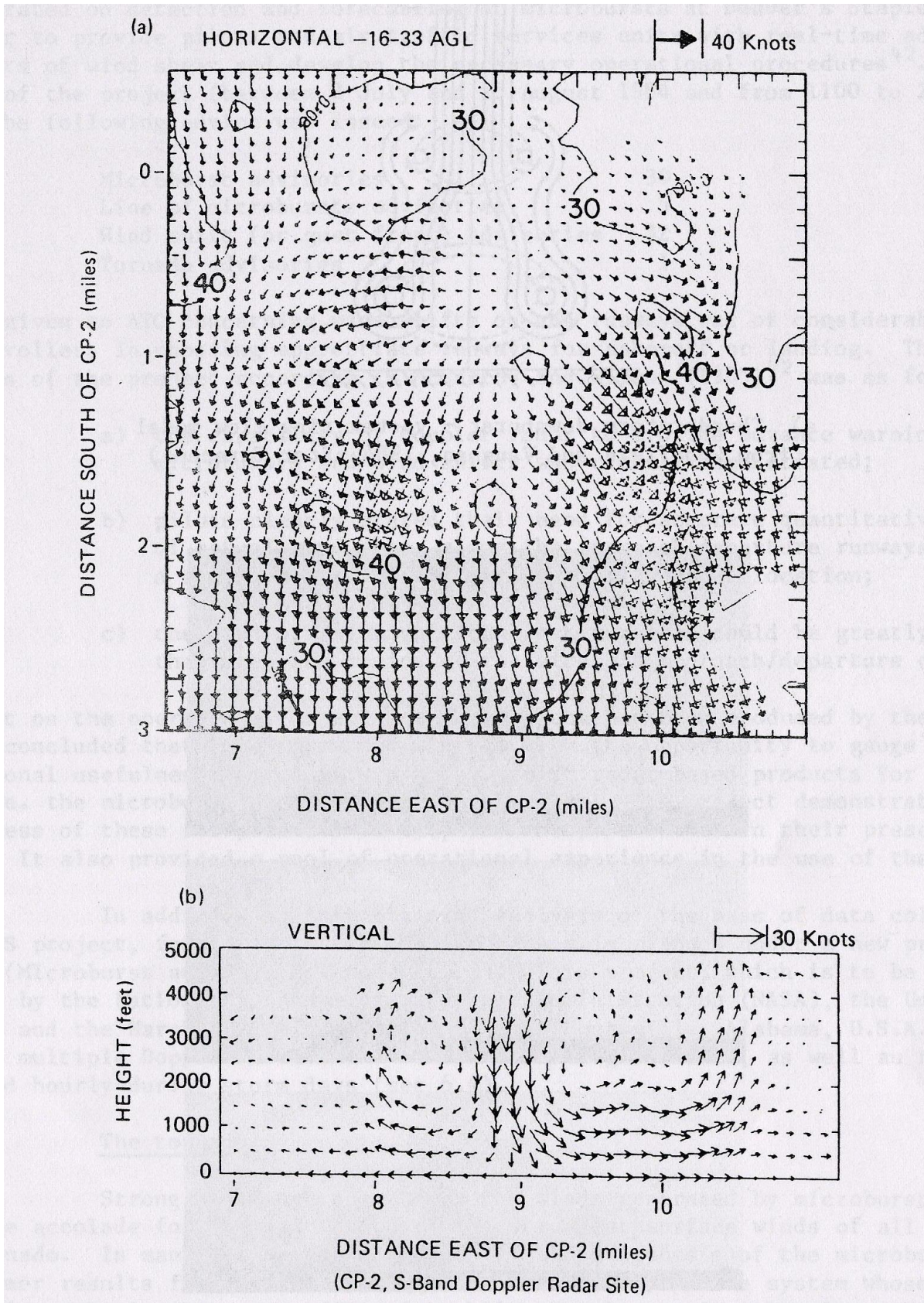
Şekil 5.8 Çeşitli Durumlarda Pilotun Hesaba Katması Gereken Rüzgar Vektörleri

etkilediği bir durumda, pilot, uçağın itme gücünü kullanarak uçağı ivmelendirmelidir. Bu ivmelenmeye rağmen Rüzgar Sheari durumunda uçağın hızı yine de azalacaktır. Fakat Rüzgar Shearinin etkisi bertaraf edilmiş olacaktır. Büyük jet yolcu uçakları için tipik ivme değeri 3 kt/s'dir. İniş sırasında yere yakın seviyelerde meydana gelen Rüzgar Sheari ve sakin hava koşulları durumunda pilotun hesaba katacağı bağıl rüzgar vektörü şekil 5.8'de gösterilmektedir. Şekilde, sakin hava koşullarında, kafa rüzgarı durumunda, kuyruk rüzgarı durumunda ve aşağı doğru hava hareketi durumundaki bağıl rüzgar vektörleri görülmektedir. Ayrıca bağıl rüzgar vektörü ve angle of attack açısı arasındaki ilişki de görülmektedir. Pilot bu vektör rüzgarları hesaba katmalıdır. Buna göre hızını ve yönünü tayin etmelidir.

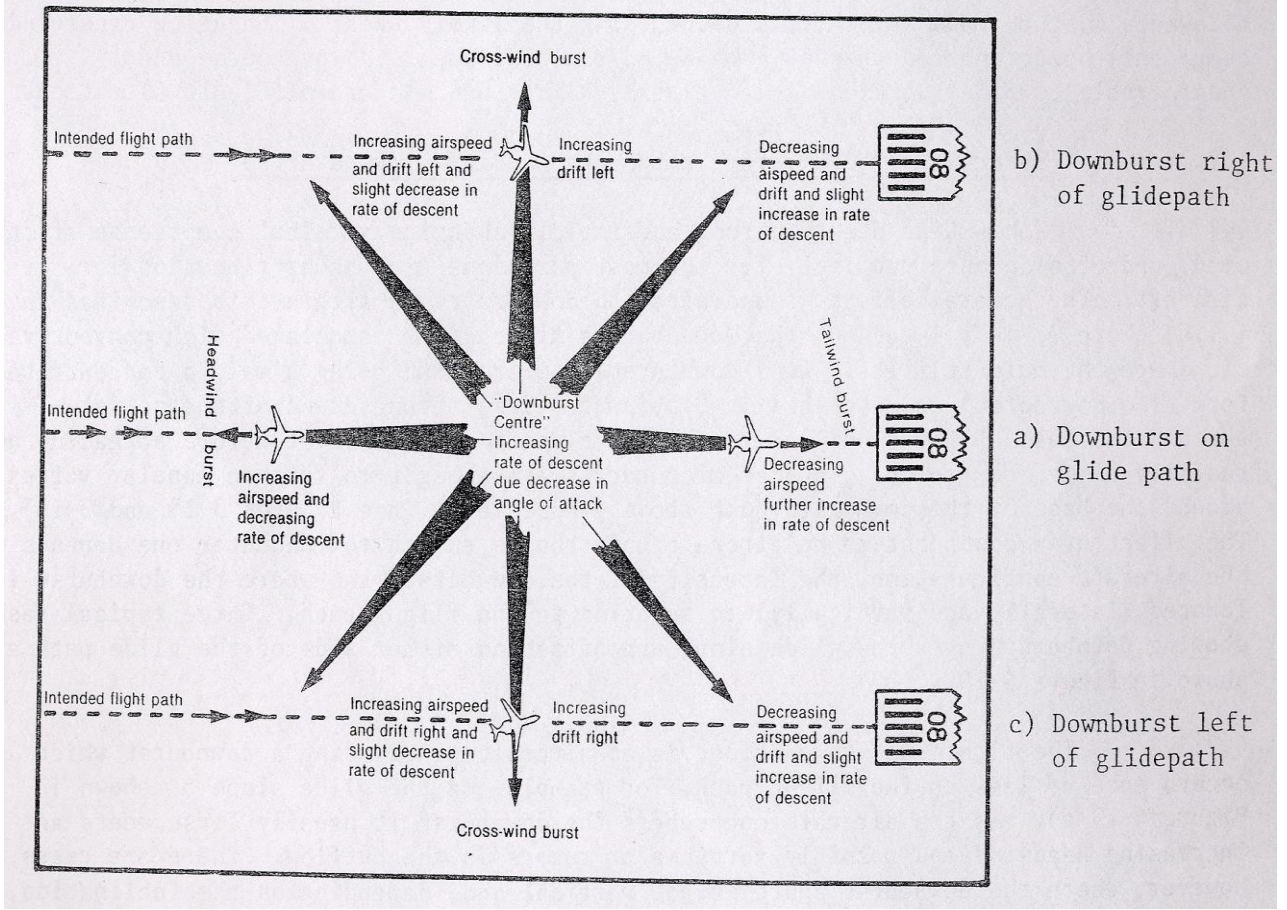
5.4.2 Rüzgarın Düşey Bileşeninde Meydana Gelen Rüzgar Shearinin Uçaklara Etkisi (Yukarı ve Aşağı Doğru Hava Hareketi)

Rüzgarın düşey bileşeninde meydana gelen ani değişim (yukarı ve aşağıya yönelen ani hava hareketi) uçaklar için önemli tehlike oluşturan Rüzgar Sheari etkisidir. Konvektif etkilerin hüküm sürdüğü ve dikey hareketliliğin etkisini arttırdığı hava koşullarında düşey bileşende meydana gelen Rüzgar Sheari herhangi bir uçak için oldukça tehlikelidir. Bu tip hava koşullarında downburst ve buna bağlı olarak microburst gibi önemli hava olayları meydana gelebilir. Downburst durumunda, yukarı seviyelerden yere doğru hareketlenen hava, ani bir dönüşle, tabanı yere yakın seviyelerde bulunan konvektif bulutun içerisine kuvvetlice dahil olur ve bunun sonucunda rüzgarın düşey bileşeninde ani bir değişiklik meydana gelmiş olur. Bu Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Eğer yere doğru olan düşey hareket çok şiddetli ise bu etki yer ile birleşir ve düşey kesitte konvektif bulutun tabanı yere inmiş gibi görünür. Bu durum mikro patlama (microburst) olarak tanımlanır. Microburst durumunda, bulut içinde ve buluta yakın mesafedeki yerlerde kuvvetli girdap etkisi meydana gelir. Girdap etkisi düşey mesafede yukarı seviyelerden yer seviyesine kadar uzanır. Bütün bu olumsuz hava koşullarının uçaklar üzerindeki etkileri, downburst'un şiddetine ve uçağın tip ve biçimine bağlıdır. Ama her ne olursa olsun bütün uçaklar söz konusu hava koşullarından olumsuz etkilenirler. Şekil 5.10'da, iniş esnasında, bir uçağa etki eden downburst'un uçağın iniş eğimini nasıl değiştirdiği üç farklı durum için (ortadan, sağdan ve soldan etki) gösterilmiştir.

Downburst etkisinde kalan bir uçağın uçuş yolu artar veya azalır. Bu mutlaka hesaba katılmalıdır (Şekil5.10 a). Uçak downburst ile karşılaştığı zaman kafa rüzgarı artış gösterir.



Şekil 5.9 Downburst Durumunda Yatay ve Dikey Akış



Şekil 5.10 Downburst'un Uçağa Etkisi

Daha sonra kuvvetli dönüş hareketi ve uçaktan dışarı doğru hava akımı uçağa etki eder. Downburst ekseninin belirgin bir şekilde eğimli olduğu durumlarda etki alanı içerisinde çok farklı rüzgarlarla karşılaşılabilir. Örneğin bir tarafta dışı doğru esen kuvvetli rüzgar varken bunun tam zıt tarafında rüzgar aniden kesilebilir ve bu Rüzgar Shearine çok güzel bir örnektir. Böyle durumlarda uçağın kafa rüzgarı artabilir. Artan kafa rüzgarı uçağın hızının artmasına neden olur uçak ani bir şekilde kendi doğal rotasının üzerinde uçmaya başlar.

Yukarı ve aşağı doğru olan hava hareketleri bağlamında, hamle cephesi de uçakların iniş ve kalkışında önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Bilindiği gibi, hamle cephelerine, ana oraj hücrelerinden oldukça uzak mesafelerde de rastlanabilmektedir. Squall hatlarında hamle cephelerinde sıkça rastlanabilmektedir. Hamle cephesi durumunda yer seviyesinin hemen üzerinde kuvvetli rüzgar değişimi meydana gelir. Bu durum uçağın iniş ve kalkışında kafa rüzgarının ani bir şekilde değişmesine ve çoğu zaman artmasına neden olmaktadır. Ayrıca hamle cephesi durumunda çapraz rüzgar büyük tehlike oluşturur.

6. Alçak Seviye Rüzgar Sheari Ölçüm Yöntemleri

Operasyonel gereksinim olarak rüzgar sheari bilgilerinin pilotlar için sağlanması çok önemlidir. Bu bilgiler gözlem ya da tahmin olabilir.

Uzaktan algılama sistemleriyle (uydu ve radar) rüzgar shearinin tespiti oldukça zor olmaktadır. Çeşitli yer sistemleri sheari tespit ve şiddetinin ölçülmesinde kullanılmaktadır.

6.1 Yer Gözlemleri

6.1.1 Görerek Gözlem

Rüzgar shearinin tek başına gidişatı, ilerleyişi görülemez. Ancak çoğunlukla etkileri görülebilir. Oluşum sebepleri ya da yeryüzünde meydana getirdiği etkilere bakılarak, aynı zamanda başka meteorolojik bilgilerin yardımıyla rüzgar sheari tespiti yapılabilir.

6.1.2 Uygun Meteorolojik Aletlerle Gözlem

6.1.2.1 Anemometrelerle: Yatay planda pist boyunca, yatay rüzgar shearini ölçmek için anemometreler kullanılabilir. Teker alma ve teker koyma gibi uçuş için önem arz eden noktalara anemometreler kurularak rüzgar bilgileri ölçülebilir.

6.1.2.2 Sondaj Balon: Balon yükselirken seviyeler arası rüzgarlardaki farklılıkları ölçülür. Dikey rüzgar shearinin profilini görme açısından çok yararlıdır. Havaalanlarında özellikle dikey rüzgar sheari tespitinde sıkça kullanılan metottur.

6.1.3 Yer Meteoroloji Radarı: Zayıf ve farklı ekoları algılamada genellikle squal hattından doğan hamle cephesi tespitinde kullanılan küçük çaplı meteorolojik radarlar mevcuttur. Bu cephelerden meydana gelen rüzgar shearini ölçmede bu radarlar kullanılabilirler.

6.2 Meteorolojik Uydular ile Gözlem: Rüzgar sheari ile ilgili olan hamle cepheleri uydular ile gözlenebilir. Cephelerin analizleri ile Shear tespiti yapılabilir.

6.3 Rüzgar Sheari Tespiti ve Ölçüm için Kullanılan Özel Sistemler

6.3.1 LLWAS: Bu sistemin; havacılık güvenliğinin artırılması, iniş minimalarının geliştirilmesi, hava trafik yoğunluğunun fazla ve nispeten küçük yatırım bütçeler için meydanlara kurulumu gereklidir. Özellikle geniş bütçe gerektiren meteorolojik radarların havaalanlarına kurulamadığı

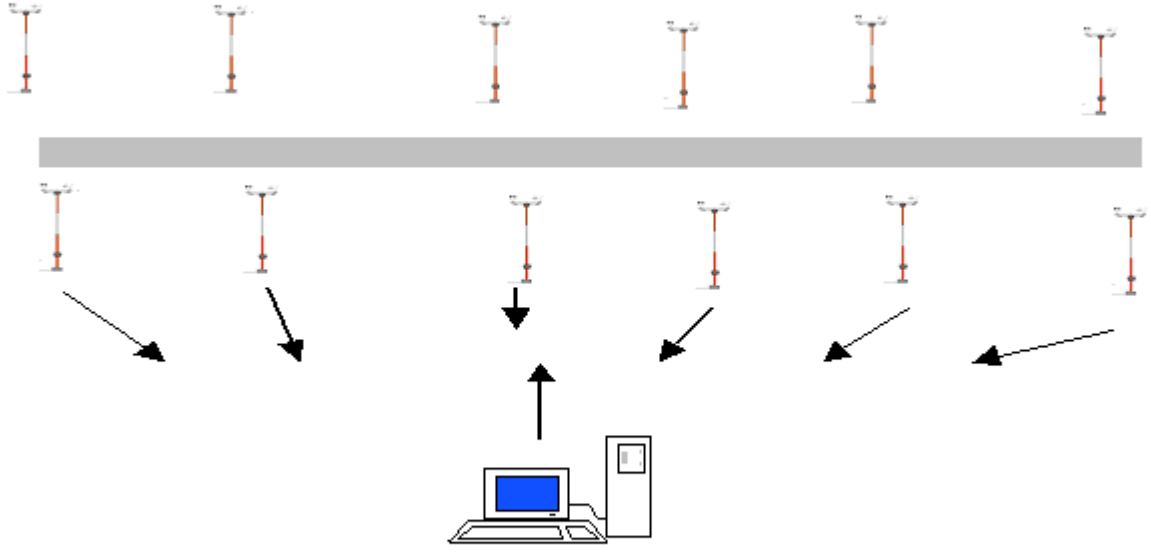
alanlarda ilk seçim LLWAS' tır. Aynı zamanda bu sistem rüzgar shearinin tespitinde terminal meteorolojik radarlarla kombine şeklinde kullanılabilirler. LLWAS aynı veri edinme, ürün işleme ve iletişim alt sistemleri için AWOS' lar ile birlikte entegre şeklinde kullanılabilirler.

LLWAS temelde; havaalanında kritik yaklaşma ve kalkış koridorları boyunca etrafa yerleştirilmiş ayırık rüzgar sensörlerinden oluşmaktadır. Standart kurulumda 12 sensör bulunurken havaalanının büyüklüğüne göre 10-52 arasında sensör yerleştirilebilir. Bu sensörler 500 dizi rüzgar vericisi ve herhangi bir anemometre veya sesötesi (ultrasonik) rüzgar sensörü içermektedir. Rüzgar vericisi, rüzgar sensörlerini ve bilgi iletişimini data işleme merkezinde örnekler. Rüzgar vericisi, gerekli olan bilgi derlenmesini, doğrulamayı iletişim fonksiyonlarını yönetir. Verici; güneş paneli ve yedek pili kullanımıyla düşük enerji tüketimi ile azami işlem gücüne sahiptir. Rüzgar sensörü, verici ve opsiyonel ışık kuleye de kurulur. Uygulamada azami sistem performansı ve algoritma güvenliği için, çevresel etkenlerin değişimi sonrası rüzgar direklerinin yerleri ve uzunluklar değiştirilebilmektedir.

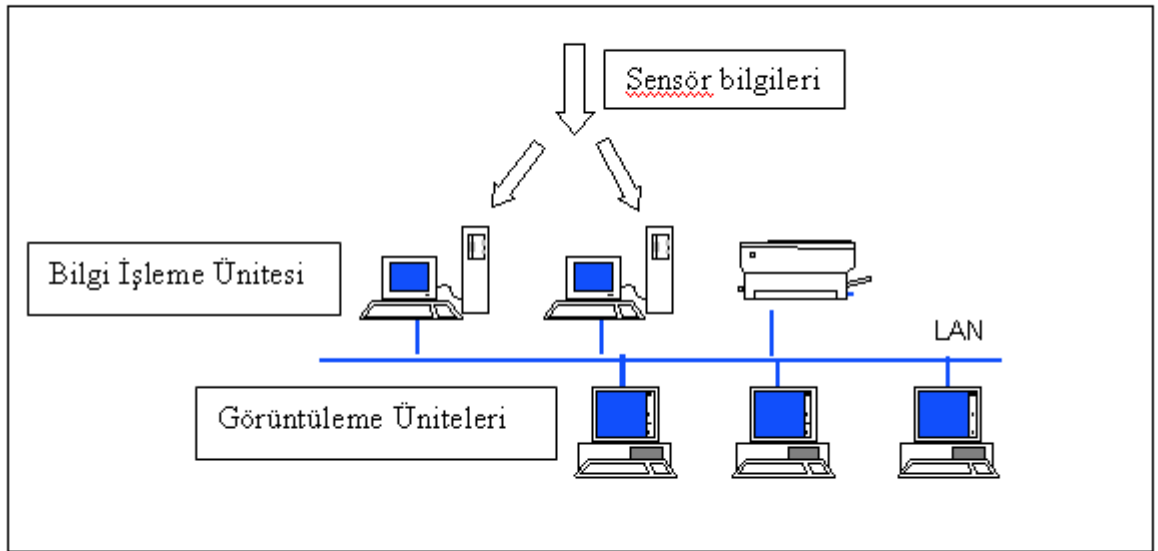
Bu sistem rüzgar sensörleri, mikro işlemci ve görüntüleme ünitelerinden oluşur. Basitçe çalışma prensibi; çevre ve merkezdeki yer rüzgarı arasındaki vektörel farkı hesaplar. Çevre sensörleri anlık rüzgar bilgilerini ölçer ve bu bilgileri merkez kontrol ünitesi ile her 10 saniyede bir görüntüler ve örnekler. Merkez sensörü ise iki dakikalık aralıklarla ortalama yer rüzgarı değeri üretir. Alınan bu değerler sonradan karşılaştırılır. Merkez alan rüzgar bilgileri ve rüzgar hızıyla bağlantılı olarak gereken hamle faktörü bilgilerini veren görüntüleyiciler hava trafik kontrole monte edilir. Eğer çevre sensörler ile merkez sensörü arasındaki vektör farkı 15 knot ve daha fazla ise çevre rüzgarı gösterilir ve görsel-ışitsel alarm çalışır. Kontrolcü çevre sistemlerin birini veya hepsini seçebilir.

Birçok uçak kazasından sonra LLWAS dizayn edilmiş sonrasında kurularak meydanlarda işletmeye alınmıştır. Gelecek araştırma konusu olarak; konvektif gelişmeyle bağlantılı olan rüzgar sheari için yeni sistemler ele alınmaktadır.

Bilgiler sensörlerden, direkt olarak kablo bağlantısı ile olabileceği gibi radyo bağlantısı ile de olabilmektedir. Kablo gerektirmeyen bağlantılar daha uygun alternatiflerdir.



Şekil 6.1 LLWAS Rüzgar sensörleri ve veri toplanması



Şekil 6.2 LLWAS Bilgilerinin işlenmesi

LLWAS şu bilgileri sağlamaktadır;

- Havaalanında ve pist boyunca rüzgar shearinin tespiti,
- Microbursta bağlı rüzgar kesmesinin belirlenmesi,
- Rüzgar kesmesine bağlı baş rüzgarındaki artışın veya azalışın yorumlanması,
- Rüzgar kesmesiyle ilk karşılaşma yerinin belirlenmesi,
- Tespit etme olasılığı %90 dan fazladır,
- Yanlış alarm olasılığı %10' un altındadır.

6.3.2 Ses Dalgası Dedektörü ve Değişimi (SODAR)

SODAR sistemi analog radar olup ses dalgalarıyla (~ 1500 Hz) alçak seviye sıcaklık terselmesini (enverziyon) algılayan sistemdir. Doppler teknolojisinin kullanımı alçak seviyede, farklı yüksekliklerde rüzgar hızını ve yönünü ölçme imkanı sağlar. Rüzgar profili (Wind Profiler) rüzgar kesmesi bilgilerini hesaplayıp görüntüleyebilir. Ses kirliliğinin olduğu ve yoğun yağış altında çalışma performansları düşebilmektedir.

6.3.3 Doppler Radar

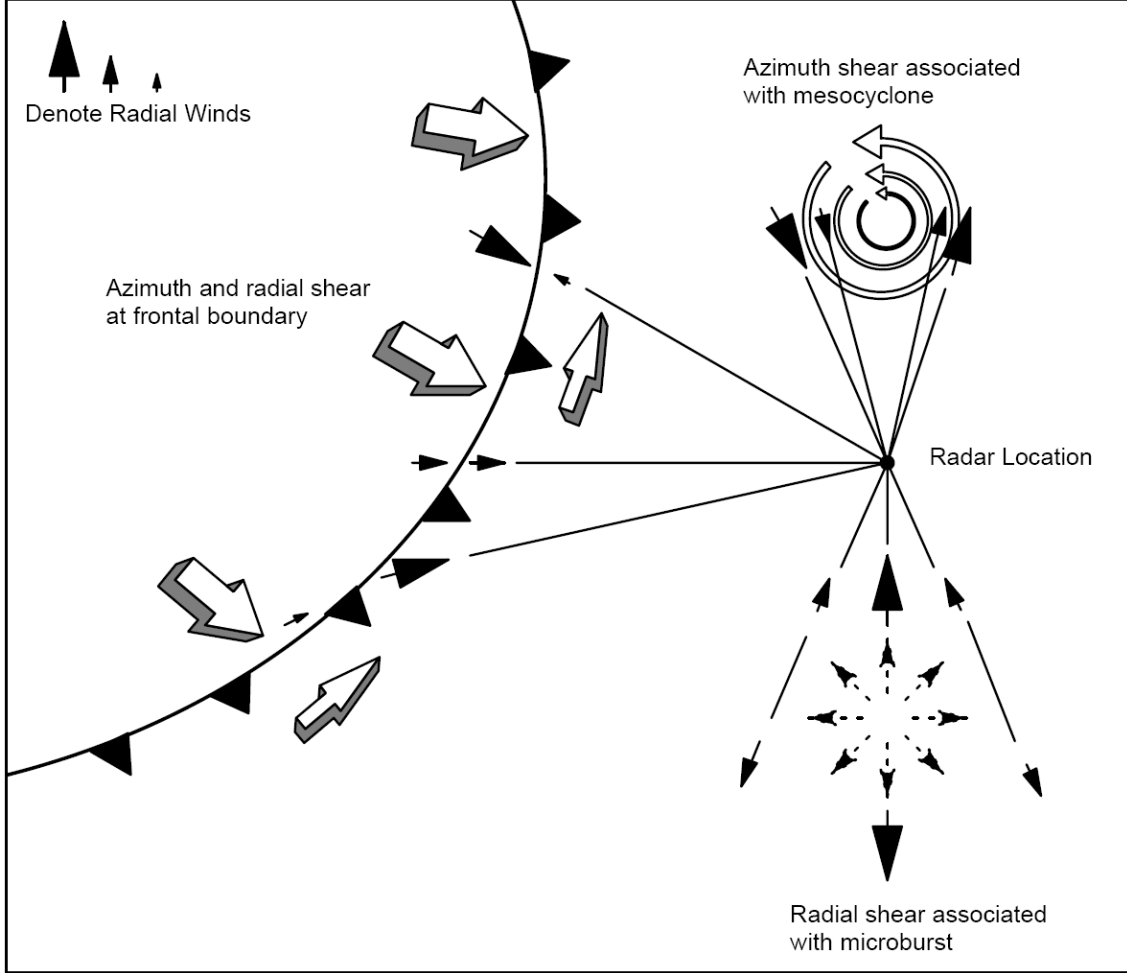
6.3.3.1 Doppler Radar ile ölçülen rüzgar Sheari shear ile İlişkili Meteorolojik Hadiseler

Microburst: Konvektif fırtınalar ile ilişkilidir. Özellikle kalkış ve iniş anlarında uçaklar için ciddi anlamda tehlike teşkil eder. Microburst'ler 3 km'den küçük ve kabaca dairesel bir alanda radar tarafından ölçülen radial shear'ın pozitif değerleri ile (kuvvetli divergence sahalarını gösterir) karakterize edilir.

Hamle Cephesi (Gust Fronts): Orajı meydana getiren Cb'lerin hareket istikametlerinin ön taraflarında oluşur. Yağışla birlikte aşağıya hareketlenen serin havanın ısınan havanın yerini almasıyla başlayan rüzgârın hızı sıcaklık farkına bağlı olarak artar ve hamle cephesi oluşumuna neden olur. Kısaca hamle cephesi, konvektif bir fırtınadan dışarı doğru gerçekleşen soğuk akışın fırtınayı çevreleyen hava ile etkileşmesi sonucu oluşur. Radar tarafından ölçülen negatif radial shear ile (konverjans sahaları) karakterize edilirler. Yine de, oluşum geometrisine bağlı olarak, pozitif veya negatif radial veya azimuthal shear değerleri ortaya çıkarabilir.

Mezosiklon: Dönüş hareketi ile karakterize edilirler. Mezosiklonlar tornadolar ile ilişkilidir. Mezosiklon tespiti için azimut shear kullanılır.

Soğuk Cephe: Hamle cephesi ile benzerdir ancak daha geniş alanlara yayılır.



Şekil. 6.3

6.3.3.2. Radarların ölçtüğü radial rüzgar hızından hesaplanabilen shear değerleri

Radial Shear: Radial hızların (vektörel olarak) mesafe boyunca (merkezden dışarı doğru, radar ışının takip ettiği yol boyunca) farklarından hesaplanır. Pozitif radial shear değerleri, mesafe ile artan radial hızı gösterir. Radial rüzgarın diverjansı pozitif değer verir.

Azimut Shear: Azimuta göre radial hız farkından hesaplanır. Pozitif azimut shear değerleri saat dönüş yönünde artan radial hız değerlerini gösterir. Bu pozitif vortisiteye denk gelir.

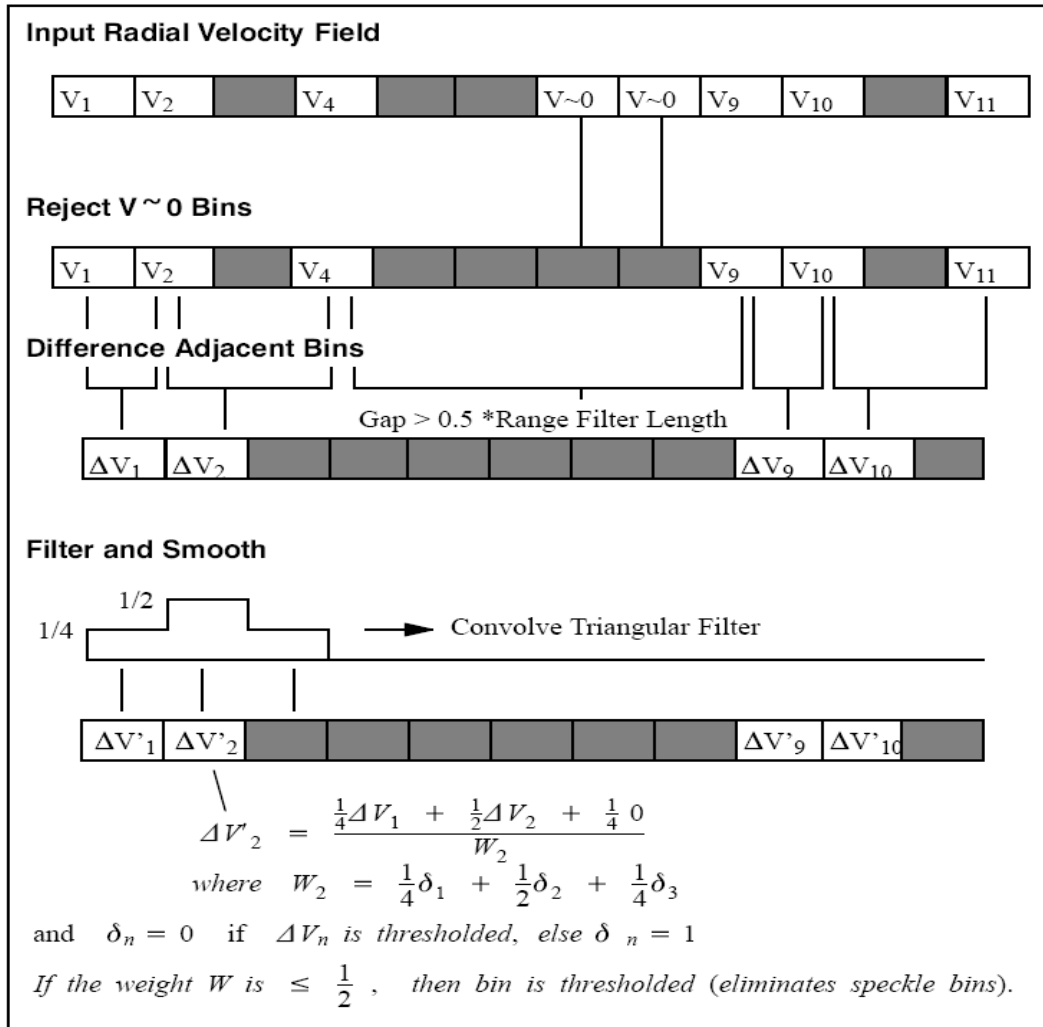
Elevasyon Shea: Elevasyona göre radial hız farkından hesaplanır. Pozitif elevasyon shear değerleri yükseklikle artan radial hız değerlerini gösterir.

Bu üç temel shear hesaplaması dışında, bunların kombinasyonlarından oluşan ve RMS değerlerinin alınması ile hesaplanan shear çeşitleri de vardır. Mesela aşağıdaki formül toplam birleştirilmiş (combined) shear değerini verir.

$$\text{SQRT} (\text{RAD}^2 + \text{AZ}^2 + \text{EL}^2)$$

RAD, AZ ve EL temel shear değerlerini ifade eder. Birleştirilmiş shear değerleri daima pozitiftir.

6.3.3.3. Radial Shear Algoritması



Şekil. 6.4

Radarlarda kullanılan radial shear hesaplama algoritması Şekil – 4’te açıklanmıştır. Bu algoritma kabaca 3 aşamadan oluşmaktadır.

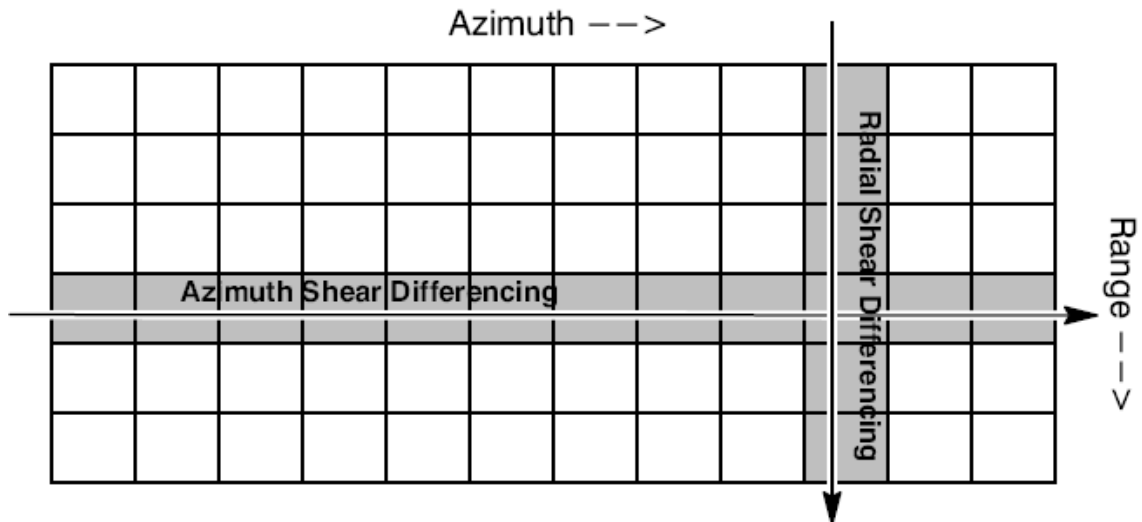
- Clutter (yer ekosu) olarak işaretlenen ölçüm noktalarının elenmesi,
- Ölçüm noktalarının komşuluklarındaki noktalar ile hız farklarının hesaplanması,
- Hız farklarının filtrelenmesi.

Clutter Eleme İşlemi: Öncelikle, doppler filtresinden elenmeden geçen ancak hızı 0’a yakın bir değer olan ($0 - \text{MaxHız} \cdot 0.02$ ile $0 + \text{MaxHız} \cdot 0.02$ aralığında kalan) ölçüm noktaları clutter olarak işaretlenir ve elenir (Şekil – 4’te V~0 ile gösterilen ölçüm noktaları). Bunun dışında diğer bir eleme işlemi, herhangi bir komşuluğundaki ölçüm noktası ile arasındaki mesafe belirli bir eşğin üzerinde olan ($> 0.5 * \text{RangeFilterLength}$) ölçüm noktaları da işaretlenir ve elenir (Şekil – 4’te V4 ile gösterilen ölçüm noktası).

Hız Farklarının Hesaplanması: Eleme işleminden sonra kalan ölçüm noktalarının komşulukları ile hız farkları hesaplanır.

Hız Farklarının Filtrelenmesi: Son olarak elde edilen ΔV hız farkları şekilde gösterilen üçgen filtre ile konvolv edilir, yani üçgen filtre ile filtrelenir. Bu filtreleme işlemi aslında ağırlıklı ortalamadan başka bir şey değildir. Eğer ağırlık değeri 0.5’den küçük veya eşit ise ($W \leq \frac{1}{2}$) o ölçüm noktası da speckle (gürültü kaynaklı hatalı değer) olarak işaretlenir ve elenir.

radial shear ile azimut shear arasındaki fark

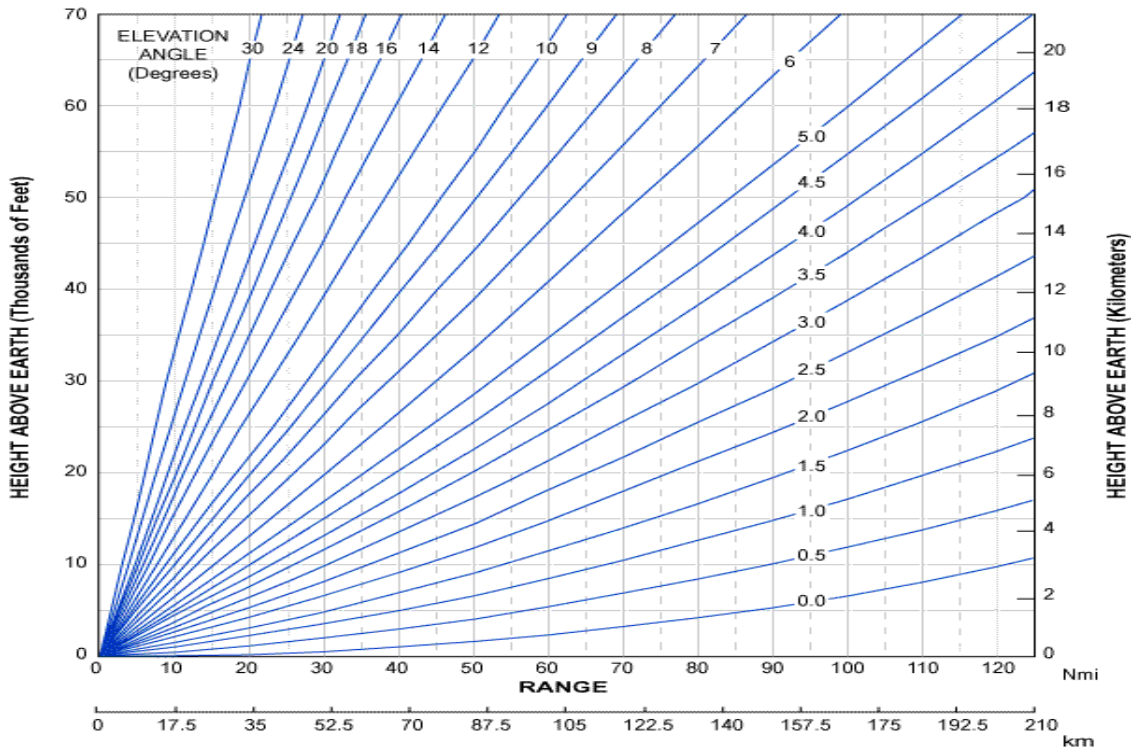


Şekil. 6.5 radial shear ile azimut shear arasındaki fark

Şekilden de görüleceği üzere tek fark, hız farklarının hesaplandığı doğrultudur. Azimut shear için komşuluk bitişik azimutlar iken, elevasyon shear için komşuluk bitişik elevasyonlardır.

Bilindiği üzere DMİ Genel Müdürlüğü, biri dual-polarizasyon olmak üzere 4 adet C-band Doppler radar işletmektedir. Ülkemizin topoğrafik yapısı dikkate alındığında, yeterli sayılabilecek bir radar kapsamına sahip ve aynı zamanda meteorolojik hadiselerin sağlıklı takibine imkan sağlayacak radar noktaları bulmanın ne denli zor olduğu açıkça görülebilir.

Uygun bir radar yeri seçerken elbette en önemli kriter kapsama analizi olmalıdır. Ancak radar kapsamının yanı sıra radarın kurulacağı nokta taranan bölgedeki meteorolojik hadiselerin takibini de mümkün kılacak bir yükseklikte olmalıdır. Radar sinyalinin, dünyanın eğriselliğine ve elektromanyetik dalganın atmosferdeki yayılım karakteristiğine bağlı olarak kaynaktan uzaklaştıkça yerden yüksekliğinin daha da arttığı da unutulmamalıdır (Şekil -1). Bu nedenle meteorolojik radarlar kurulurken yeterli kapsamayı sağlayabilecek kadar yüksek, ancak meteorolojik hadiseleri görebilecek kadar da alçak noktalar seçilmelidir. Ülkemiz gibi bir topografyada meteorolojik radarlardan maksimum faydanın sağlanabileceği optimum radar kurulum noktalarının bulunması oldukça zordur.



Şekil 6.6 Radar sinyali için mesafe yükseklik ilişkisi

Doppler meteorolojik radarlar, bilindiği gibi reflektivitenin yanı sıra hız ve spektral genişlik gibi hidrometeorların (yağmur, kar, dolu, vs.) hareketlerine ilişkin bilgiler de sağlarlar. Ancak doppler radarların ölçebildikleri hızlar hedeflerin radial doğrultudaki hız bileşenleridir (Şekil – 2). Yani tek başına bir doppler radarın, herhangi bir hedefin gerçek hız vektörünü tespit edebilmesi mümkün değildir.

Ancak meteorolojik radarlar, çeşitli algoritmalar yardımıyla radial hız bilgisinden yaklaşık rüzgar vektörüne ait bilgiler çıkarabilmektedirler. Elde edilen bu rüzgar bilgisi kullanılarak, havacılık amaçlı çeşitli ürünler (Wind Shear gibi) oluşturulabileceği gibi havacılık açısından tehlike arz eden çeşitli meteorolojik hadiseler (Microburst) için uyarılar da yapılabilir. Tabi ki burada en önemli nokta, kurulacak radarın öncelikli görevinin iyi tarif edilmesi ve sistemin özelliklerinin ona göre (radar tipi, radar yeri, vs.) belirlenmesidir. Aksi halde 1800-2000 metre civarında bir yüksekliğe sahip bir noktada ve yağış ölçme amacıyla kurulmuş bir radardan 800-1000 m civarında rakıma sahip bir havaalanı pisti için kullanışlı bir wind shear ürünü üretmesini ve/veya tutarlı bir microburst uyarısı yapabilmesini beklemek durumunda kalınabilir. Elbette bu mümkün değildir. Özellikle sadece C-band doppler radar verileri ile yere çok yakın seviyeler için (Low Level) Wind Shear tespiti ve/veya uyarısı yapmak imkansızdır.

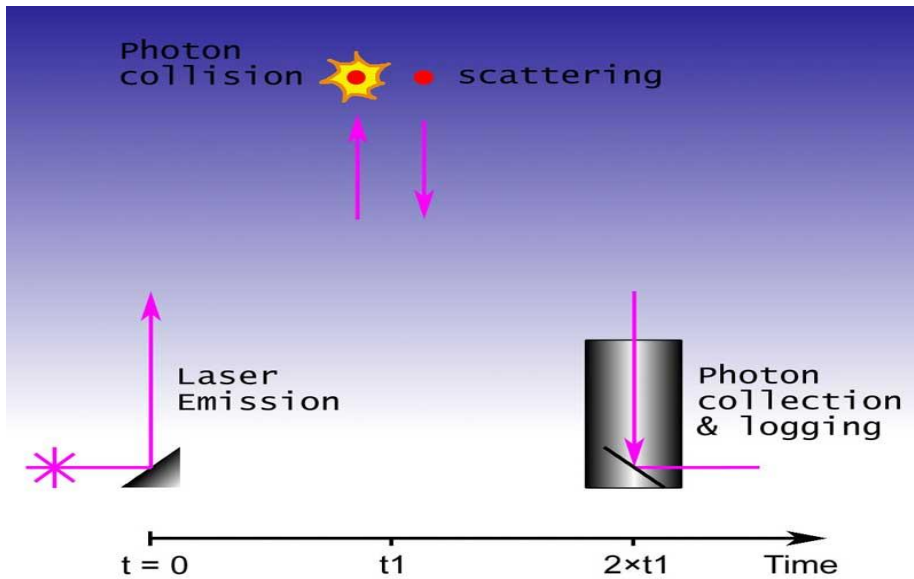
Fakat bu durum C-band doppler radarların meteorolojik açıdan havaalanlarının kullanabileceği hiç bir veri sağlayamayacağı şeklinde anlaşılmalıdır. C-band doppler radarlar, radar merkezine çok uzak olmayan, en azından 120 km yarı çaplı radar kapsama alanı içerisinde kalan her nokta için oldukça önemli reflektivite ve hız verileri sağlayabilmektedirler. Mesela her piksel için mm/h cinsinden yağış bilgisi, şiddetli meteorolojik hadiselerin (Cb ve oraj gibi) takibi, radarın kurulu olduğu bölgenin yüksekliğine bağlı olmak üzere 2 km, 3 km, 5km, vs. gibi seviye rüzgarı bilgisi (estimated), bu rüzgar verilerinden elde edilen (yatay, düşey ve radial yönlerin her türlü kombinasyonu şeklinde) wind shear bilgisi gibi havaalanlarında yardımcı ve/veya ikincil veri olarak kullanılacak ürünler üretilmektedir. Bu ürünler havaalanları açısından değerlendirilirken radar ürünlerinin elde edildikleri yükseklikler ile havaalanları için önem arz eden yükseklikler arasında olması muhtemel ciddi seviye farklılıkları göz ardı edilmemelidirler. Ayrıca bu ürünler, yağış ölçme amaçlı C-band doppler bir radar tarafından sadece yağış anında sağlanabilmektedir, radar kapsama alanında yağış olmaması durumunda bu tip radarlardan atmosferdeki herhangi bir hadiseye ilişkin veri alınması mümkün değildir.

C-band doppler meteorolojik yağış radarlarının yukarıda bahsedilen dezavantajları nedeniyle, havaalanlarının ihtiyaçlarına daha iyi cevap verecek radar prensibi ile çalışan çeşitli ölçüm cihazlarına yönelmek ve hatta bunların bir kaçını bir arada kullanmak mecburiyeti ortaya çıkmıştır. Bunlardan bazıları genelde X-band olarak üretilen TDWR (Terminal Doppler Weather Radar), LIDAR (Light Detection and Ranging veya Laser Imaging Detection and Ranging), Wind Profiler, vs. dir.

Son olarak; konvansiyonel meteoroloji radarları; hedeften yansıyan ışını alarak uzaklık ve yön hesaplaması yapan, sonucu hesaplayıp görüntüleyen sistemlerdir. Meteorolojik doppler radarlar özellikle tekdüze rüzgar oluşumu olmayan alanlarda rüzgar shearini tespit etmesi zordur. Ancak hamle cephesi, microburst ve tornado gibi kesmeyi meydana getiren meteorolojik olaylar tespit edebilir. Ayrıca yer engelleri doppler radarın çalışması için büyük problemler teşkil eder. Bu metot günümüzde rüzgar sheari tespitinde kolay ve kullanılabilir değildir.

6.3.4 Doppler LIDAR

LIDAR, LIght Detection And Ranging ifadesinin kısaltmasıdır ve Işık ile Tespit ve Mesafe Tayini anlamına gelmektedir. LIDAR hedefe doğru ışık gönderir, gönderilen bu ışık hedef ile etkileşir ve ışığın bir kısmı kaynağa doğru (yani LIDAR'a doğru) geri yansır ve/veya saçılır. Bu geri yansıyan ve/veya saçılan ışık analiz edilir ve ortaya çıkan değişiklikler hedefin özelliklerinin tespit edilmesini sağlar. Işığın geri yansıma süresi ölçülerek hedefin mesafesi kolayca tespit edilebilir (ışık hızı da bilindiği için).



Şekil 6.7

6.3.4.1 LIDAR Çeşitleri

- Range Finders
- DIAL (Differential Absorption LIDAR)
- Doppler LIDARs

Range Finders: En basit LIDAR tipidir. Katı bir hedefin uzaklığını tespit etmek için kullanılırlar.

DIAL (Differential Absorption LIDAR): Bu tip LIDARlar atmosferdeki ozon, su buharı, kirlilik, vs. gibi kimyasal konsantrasyonları ölçmek için kullanılırlar. DIAL 2 farklı dalga boyunda lazer kullanır, bir tanesi ilgilenilen molekül tarafından emilen (absorb edilen) bir dalga boyu olurken diğeri aynı molekül tarafından emilmeyen bir dalga boyu olmaktadır. Bu iki farklı dalga boyundan geri yansıyan sinyaller arasındaki fark analiz edilerek ilgilenilen molekülün konsantrasyonuna ilişkin sonuçlar elde edilir.

Doppler LIDAR: Bu cihazları temelde hedefin hızını ölçme amaçlı kullanılmaktadırlar. Doppler prensibine göre, LIDAR'dan gönderilen ışık LIDAR'a göre yaklaşan veya uzaklaşan bir hedefe çarparak geri yansır. Geri yansıyan sinyalin dalga boyunda küçük de olsa bir değişim meydana gelir. Bu değişim Doppler shift olarak bilinir ve bu nedenle Doppler LIDAR olarak adlandırılırlar. Eğer hedef LIDAR'dan uzaklaşıyor ise dönen sinyal (ışık) nispeten daha uzun dalga boyuna sahip olur. Tersisi şekilde eğer hedef LIDAR'a yaklaşıyor ise dönen sinyalin dalga boyu daha kısa olacaktır. Bu ilkelere göre katı bir cisim veya atmosferik bir parçacık (hidrometeor, toz, duman, vs) olabilen hedefin radial hızı tespit edilir. Doppler LIDAR'lar, meteorolojik uygulamalarda lazer dalga boyunda tespit edilebilen aerosollerini tespit ederek, bu tip hedeflerin hareketleri analiz eder ve rüzgar bilgisine ulaşır. LIDAR'lar en iyi performansı, açık ve kuru (yağışsız) hava koşullarında gösterirler.

Bu tip LIDAR'lar, Doppler Radarlar ile çok büyük benzerlik göstermektedirler, tek ciddi fark çalışılan dalgaboyu yani çalışma frekansıdır. Bu yüzden Laser Radar olarak da adlandırılmaktadırlar. Laser Radarların kullandığı dalga boyu meteorolojik radarların kullandığı dalga boyundan 10000 – 100000 kat daha kısadır. Bu Laser Radarların çok daha küçük çaplı parçacıklara duyarlı olmalarını sağlamaktadır. Bu sayede açık havada da atmosferik hareketler tespit ve analiz edilebilmektedir.

Laser Radarların sürekli dalga (continuous wave - CW) veya palsli olarak çalışan çeşitleri vardır. CW laser radarlar geri yansıyan sinyalin uzun zaman dilimleri için toplanabildiği ve/veya hedefin yakın olduğu durumlarda kullanılırlar. Pulsli laser radarlar ise daha çok uzun mesafe ölçümlerinde ve uzun süreli sinyal toplama işleminin pratik olmadığı durumlarda tercih edilirler.

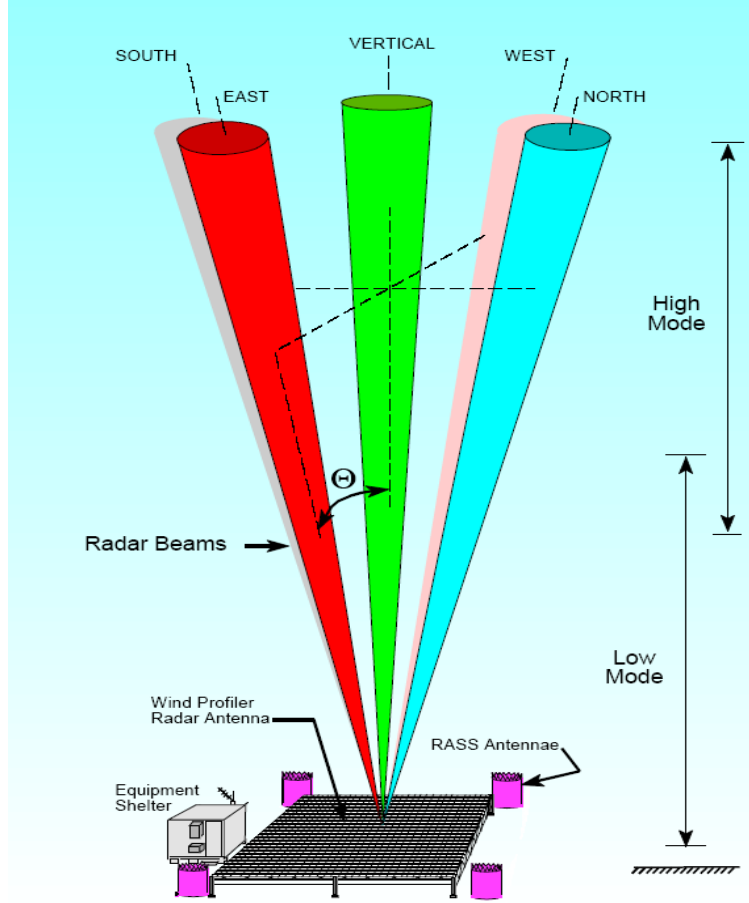
Son olarak, Laser Radarlar, monostatik (vericinin ve alıcının aynı noktada bulunduğu durum) veya bistatik (vericinin ve alıcının karşılıklı olarak konumlandırıldığı durum) olarak işletilebilirler. Çeşitli bilimsel ve işletimsel gerekçeler yüzünden monostatik uygulamanın daha makul olduğu kabul edilmektedir.

Birçok ülke rüzgar hızını ve yönünü ölçmek için Doppler LIDAR ölçme sistemleri kullanmaktadırlar. Doppler LIDAR'ın çalışma prensibi doppler radar ile hemen hemen aynıdır. Fakat uygun infra-red ışını, CO2 infra-red lazer tarafından üretilir.

6.3.5 Wind Profiler

Wind Profiler, rüzgar hızı ölçmek için kullanılan bir çeşit Doppler radardır. Açık havada radarın üzerinde atmosferin çeşitli seviyelerindeki rüzgar vektörlerini ölçebilme kabiliyetine sahiptir. Açık havada Wind Profiler'in ölçüm yapabilmesini sağlayan durum, kırılma indisindeki (refractive incex) dalgalanma şeklindeki değişimlerdir. Bragg saçılma prensibine göre, radarın çalışma dalga boyunun yarısı ölçeğindeki değişimler algılanabilir.

Bir radar ışını boyunca meydana gelen Doppler frekans kaymasından, radar ışınının görüş hattı boyunca hızlar ölçülebilir. Rüzgar sahalarının yatay olarak homojen olduğu varsayımı yapılarak, en az 3 farklı doğrultuda radar ışını ölçümü ile rüzgar hız vektörünün 3 bileşeni (x, y ve z eksenleri boyunca) elde edilebilir. Şekil – 1'de bu durum şematize edilmiştir. Şekil – 2'de ise 915 MHz'lik bir Wind Profiler sistemi görülmektedir.



Şekil.6.8



Şekil.6.9

Wind Profiler'ın ölçüm yapabileceği maksimum yükseklik verici gücüne (transmit power), anten boyutuna ve radar çalışma frekansına bağlıdır. Tablo – 1'de farklı tipte Wind Profiler'lar için bu parametreler verilmiştir.

Wind Profiler Genel Karakteristikleri			
Radar Frekansı	VHF Radar (50MHz)	UHF Radar (400MHz)	UHF Radar (1GHz)
Ölçülen Mesafe	2-20 km	0.5-17 km	0.2-3 km
Anten Boyutu	100*100 m	10*10 m	1*1 m
Verici Maksimum Gücü	1000-100 kW	10 kW	1 kW

Wind Profiler yere konuşlandırılan çoklu Doppler radarlardan (array of multiple beam) oluşan bir cihazdır ve 16 km irtifaya kadar rüzgar ölçümü yapar ve bu ölçümleri görüntüler. Bu özelliği itibariyle genellikle alçak seviye rüzgar shear'ı (low level wind shear) ölçümünde kullanılır.

Wind Profiler sistemi bir dizi şeklinde yerden yukarı doğru (dikey olarak) yönlenmiş Doppler Radar sistemlerinden oluşur. Bu 13x13 metrelik phased array antenler yatay olarak yayılmış zincir halkası gibi görünen bir dizi halinde yerleştirilir. Bu dizi radar sistemi, yer yüzeyinden 16 km'ye kadar çok sık seviyelerde atmosferik rüzgar profilini algılayabilir. Sıralı bir şekilde 3 ışına paterni (beam pattern) üretilir. Bunlardan bir tanesi dikey, diğer iki tanesi de yatık şekildedir (biri kuzeye diğeri doğuya doğru, Şekil – 1'de görüldüğü gibi).

Wind profillerlar, bulutlu ve yağışlı durumlarda da çalışacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Radar palsleri, 6-10 dakikalık otomatik döngüler şeklinde radar dizisinden atmosfere yayılır ve bu işlem sürekli tekrarlanır. Bu işlem sırasında wind profiler, radar ışına doğrultusu boyunca atmosferik saçılmalardan kaynaklanan hareketlere ilişkin doppler frekans kaymalarını ölçer. Bu saçılma hareketleri, farklı nem ve ısıya sahip hava kütlelerinin düzensiz bir şekilde karışması sonucu ortaya çıkan atmosferdeki yoğunluk değişimi ile ilişkilidir. Atmosferden yansıyan sinyaller, bilgisayar tabanlı bir sinyal işleme ünitesinde rüzgar vektörü bilgisine dönüştürülür. Böylece rüzgar verileri elde edilmiş olur. Daha sonra elde edilen bu veriler son bir saat içerisindeki ortalama rüzgar istatistikleri şeklinde son kullanıcıya sunulur.

Kabiliyetler: Tek bir Wind Profiler veya bir Wind Profiler ağı kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen bilgi, yatay ve dikey rüzgar dağılımı bilgisidir. Bu nedenle wind shear, türbülans ve jet akışı bölgelerinin tespitinde kullanılırlar. Bunlara ek olarak diverjans gibi bazı ikincil ürünler de çeşitli bilgisayar algoritmaları kullanılarak elde edilebilir.

Güçlükler: Wind Profiler kullanılarak ölçülebilecek wind shear en az yerden 500 m (bazı sistemler için bu değer 200 m'ye kadar çekilebilmektedir) yüksekte oluşmalıdır. Aksi halde ölçüm mümkün değildir. Ayrıca Wind Profiler'lar, dikey sıcaklık ve nem profilini ölçemezler. Bunun için RASS (Radio Acoustic Sounder System) adı verilen yerden 6 km'ye kadar sıcaklık profili çıkarabilen sistemler geliştirilmiştir.

6.3.6 Terminal Doppler Hava Radarı (TDWR)

Terminal Doppler Hava Radarları, havaalanlarının ihtiyaçlarına karşılık verecek şekilde dizayn edilen ve kurulan radarlardır. Bu tip radarlar son derece iyi bir clutter filtreleme kabiliyetine ve alçak seviyelerden veri sağlayabilecek hızlı bir tarama stratejisine sahip olmalıdırlar. Alçak seviyeden bilgi alma gerekliliği radarın yer ekolarından daha fazla etkilenmesine yol açabileceğinden, bu etkilenmeyi en aza indirecek uygun bir konuma ve kapsama alanına sahip olmaları gerekmektedir. Bu nedenle genelde hava alanından ~10 km mesafede, havaalanı pistini ve civarını, uçakların yaklaşma ve uzaklaşma bölgelerini iyi görebilecek bir noktaya konuşlandırılmaları önerilmektedir. Aşağıdaki resimde Hong Kong havaalanında işletilen Terminal Doppler Radarın havaalanına göre (12-13 km kuzeydoğusunda) konumu görülmektedir.

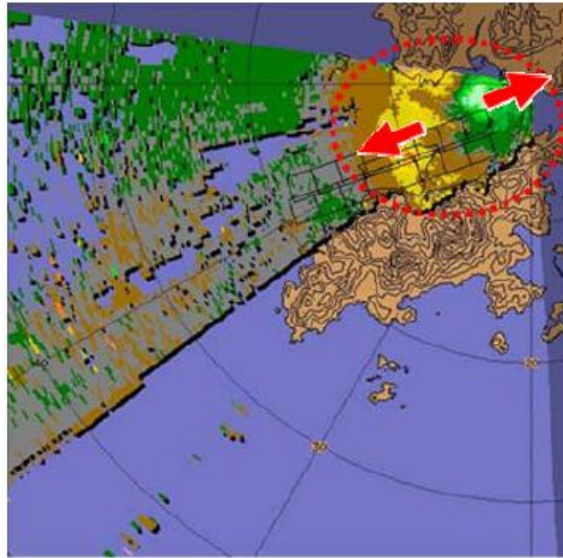


Şekil.6.10

Terminal Doppler Radarlar, X-band veya C-band olarak üretilirler ve genelde yağmur, kar, grezil, dolu, vs. gibi atmosferdeki hidrometeorları tespit etmek üzere kullanılırlar. X-band radarlar, C-band radarlara kıyasla daha kısa dalgaboyunda (daha yüksek frekansta) çalıştıklarından daha küçük parçacıklara daha hassastırlar. Bu özellikleri sayesinde C-band radarlara göre açık havada daha fazla bilgi sağlayabilirler. Ancak aynı özellikler, X-band radarların yaygın kullanımının önündeki en önemli handikap olan atmosferik zayıflama probleminin de temel nedenidir. Ayrıca düşük dalgaboyları, maksimum menzillerinin de düşük olmasına (yaklaşık 50 km'lik yarıçap) neden olmaktadır (Doppler çıkmazı). X-band radarların bu tip dezavantajlarından ötürü genelde okyanus komşusu ülkelerin (USA, Çin, vs.) havaalanlarında C-bandda çalışan TDWR'lar kullanılmaktadır.

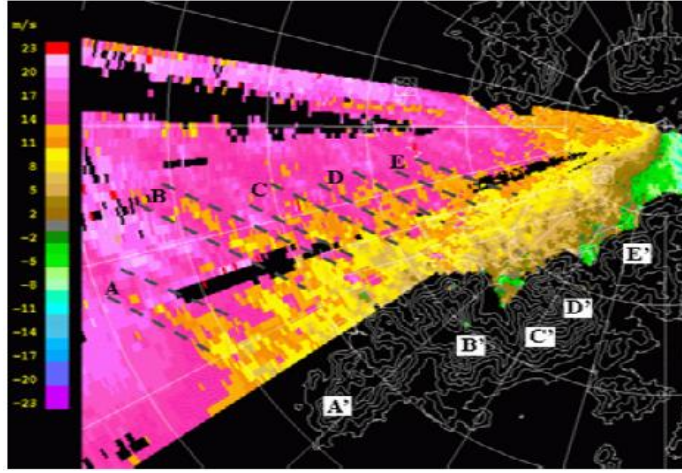
Terminal Doppler Radarlar, Doppler prensibine göre hidrometeorların hareketlerine ilişkin veriler de sağlayabildikleri için yağışlı havalarda özellikle konvektif yağışlar sırasında havaalanı pisti üzerinde meydana gelen wind shear ve microburst hadiselerini de tespit edebilirler. Bu kabiliyetleri, Terminal Doppler Radarları, havaalanlarında kurulan Alçak Seviye Wind Shear Alarm Sistemlerine (LLWSAS) veri sağlayan önemli bir cihaz konumuna getirmiştir.

Aşağıdaki şekillerde Hong Kong Uluslararası Havaalanında işletilen Terminal Doppler Radar tarafından tespit edilen microburst ve wind shear hadiselerine ilişkin görüntüler yer almaktadır.



Şekil.6.11

Şekilde yeşil renkli bölge radara yaklaşan, sarı renkli bölge ise radardan uzaklaşan hidrometeorları göstermektedir. Bu görüntü bir microburst hadisesini işaret etmektedir.



Şekil .6.12

Bu şekilde ise yaklaşan bir tropik siklon sırasında tespit edilen bir wind shear hadisesi (terrain-induced wind shear) görülmektedir. Pembe ve sarı renkli ince şeritler halinde tekrarlayan hız ekosu dizileri wind shear hadisesini işaret etmektedir.

6.4 Uçakta Tespit Edilmesi

Uçak üzerine monteli alet ve sistemlerle rüzgar shearini tespit etmek mümkündür. Ancak pilottan sadece birkaç saniye önce sheari belirleyebildiği göz önünde bulundurulduğunda, havacılıkta kullanılan ancak uçuş güvenliği açısından verimliliği düşük sistemlerdir. Bu sistemlerden bazıları;

- Standart Uçuş Güvertesi Ekipmanlarının Kullanılması (altimetre ve dikey hız indikatörü)
- Modifiye Edilmiş Dikey Hız İndikatörü
- Havada Doppler Radar
- Baş-Yukarı Göstergesi
- Modifiye Edilmiş durgun Sefer Sistemleri