

# 重力坝目标可靠指标的模糊层次 综合评判

董 耀 星

(水利系)

**提要:** 本文以模糊综合评判及层次分析法为工具提出了确定重力坝目标可靠指标 $[\beta]$ 的方法, 在单因素评价时, 对一些因素, 以现行规范为依据建立了隶属函数, 对另一些因素, 引入了语言变量的模糊向量作为评价向量; 构造出综合评价矩阵。最后给出了用这种方法分析确定 $[\beta]$ 值的两个工程实例。

**关键词:** 可靠指标, 重力坝, 模糊综合评判层次分析法

## 1 引言

可靠性方法应用于结构工程已有数十年, 1983年, 建工部颁发的《建筑设计统一标准》完全采用了这种方法, 在水工结构的设计计算中采用可靠性方法的工作也有了许多进展, 但目前对水工结构设计中应采用的目标可靠指标(或称容许可靠指标, 以下简称为 $[\beta]$ )值的确定尚未见有成果。本文运用模糊数学的综合评判方法, 结合层次分析法, 对重力坝目标可靠指标的确定进行了分析, 并以丹江口工程为例说明了这种方法的应用。

用模糊层次综合评判确定目标可靠指标 $[\beta]$ 的具体步骤如下:

### 1.1 确定因素集和评语集

影响 $[\beta]$ 值的因素很多, 故用层次分析法的观点分层研究。

评语集采用“Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ”五级别, 以Ⅰ级为最高级, Ⅴ级为最低级。

### 1.2 确定各因素的权重分配

为量化人们对权重分配的判断, 并检验这种判断的一致性, 采用层次分析法所提供的权重分配方法。

### 1.3 单因素评价, 形成评价矩阵

影响因素对各级评语的隶属函数的建立参考现有规范。求出各影响因素对各级评语的隶属度, 得出模糊向量, 即评价向量, 将各级评价向量综合即为评价矩阵。

本文1988年4月10日收到

### 1.4 进行模糊综合评判，定出 $[\beta]$ 值。

标合评判模型采用 $M(\cdot \oplus)$ ，这种模型对所有因素对按权重大小都兼顾到了，适用于考虑整体指标的评判。

## 2 $\beta$ 的影响因素及其层次关系

在《建筑结构设计统一标准》中 $[\beta]$ 的确定与结构的安全等级与破坏类型有关，而结构的安全等级又是依破坏后果来评定的<sup>[1]</sup>，而水利工程的情况就比较复杂，本文依据文献<sup>[2]</sup> [3]，经分析工程等级、荷载组合、建筑物级别、地基状况是影响岩基上重力坝 $[\beta]$ 的几大主要因素。

**2.1 工程等级：**水利工程的等级按文献<sup>[2]</sup>的标准划分，但由于等间跨度大，故应将其模糊化，以便于确定某一实际工程对等级的隶属度，模糊边界采用线性边界。

依据现行规范<sup>[2]</sup>，在决定一个工程的等级时，应考虑四个因素：水库总库容、防洪效益（包括保护城市及保护农田）、灌溉面积、水量站装机容量。这四项指标影响工程等级的确定，从而影响 $[\beta]$ 值的确定。在后面的单因素分析中分别处理。

**2.2 荷载组合：**基本荷载组合所对应的 $[\beta]$ 值应高于特殊荷载组合的极应值，且二者应有明显差距，即：荷载组合对 $[\beta]$ 的决定有很大的影响。

**2.3 建筑物级别：**工程等级确定之后，建筑物级别也是影响 $[\beta]$ 选定的主要因素。对重力坝来说，坝高是确定建筑物等级的主要考虑因素<sup>[3]</sup>。故以坝高作为衡量这一因素的指标。

**2.4 地基状况：**坝址区的基础情况是很复杂的，即使是几个主要的影响因素如基岩的极限抗压强度、断层、裂隙等对 $[\beta]$ 的影响就难以估计。考虑到所有坝基都要进行处理，对处理过的基础，工程技术人员都有一个定性的评论，如“基础良好”、“地质条件很差”等，故采用语言变量对评语级的隶属度来作出评价。<sup>[4]</sup> [5] [6] 此外，岩基与非岩基应具有不同的 $[\beta]$ 值，本文只考虑了岩基。

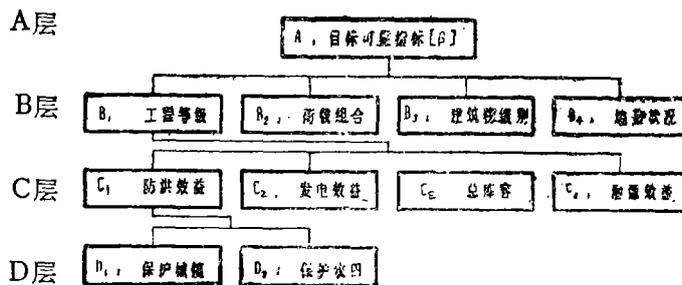


图1： 影响因素层次关系图

综上所述，岩基上重力坝目标可靠指标 $[\beta]$ 的影响因素及其层次关系如图1所示。

## 3 各因素的权重分配

因素间的权重分配反映了人们对各因素相对重要性的认识,但这种认识是模糊的,且由于判断的多重性与复杂性,使人们对这种认识的表达有时会不一致,甚至是矛盾的。层次分析法为我们提供了一个把这种认识量化表示的简易有效的办法,它不仅能使人们的判断客观化而且对这种判断的一致性进行检验。

运用层次分析法确定权重分配进行分步计算如下:

### 3.1 建立层次结构模型

所述各影响因素的层次结构模型见图1。

### 3.2 构造判断矩阵

层次分析法中采用1~9标度方法来量化判断,含义见表1<sup>[7]</sup>。

在构造判断矩阵时应注意,由于一致性的要求,第一个因素与其它因素的比较,实际上决定了其它因素间的比较<sup>[7]</sup>,为避免混乱,应按重要性由大到小排列,这样可使判断阵的上三角为1~9标度,下三角为其倒数。

下面分别构造判断矩阵。

#### 3.2.1 B层对A层相对重要性判断矩阵A~B

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
B <sub>1</sub>	1	1	3	5
B <sub>2</sub>	1	1	3	5
B <sub>3</sub>	1/3	1/3	1	3
B <sub>4</sub>	1/5	1/5	1/3	1

表1 判断矩阵标度及其含义

标 度	含 义
1	表示两个因素相比,具有同样重要性;
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素较为重要;
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要;
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要;
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要;
2	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要;
4, 6, 8	上述两相邻判断的中值;
倒 数	因素i与j比较得判断 $b_{ij}$ ,则因素j与i比较的判断 $b_{ji}=1/b_{ij}$

表2 平均随机一致性指标RI值

判断矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI值	0.000	0.000	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

3.2.2 C层对B层相对重要性判断矩阵B<sub>1</sub>~C

B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
C <sub>1</sub>	1	2	3	5
C <sub>2</sub>	1/2	1	2	4
C <sub>3</sub>	1/3	1/2	1	3
C <sub>4</sub>	1/5	1/4	1/3	1

3.2.3 D层对C层相对重要性判断矩阵C<sub>1</sub>~D

C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
D <sub>1</sub>	1	5
D <sub>2</sub>	1/5	1

3.3 层次单排序及其一致性检验

在层次单排序计算中，方根法与和积法是两种简便而具有足够精度的方法。现用方根法计算层次单排序，并进行一致性检验。

方根法计算步骤如下：

3.3.1 计算判断矩阵每行元素的乘积  $M_i = \prod_{j=1}^n Q_{ij}$

3.3.2 计算M<sub>i</sub>的n次方根  $\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}$

3.3.3 将向量  $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$  归一化，即求  $W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i}$

则  $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$  即为所求的特征向量，亦即层次单排序。

3.3.4 计算特征矩阵A的最大特征根  $\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}}{n}$ ，式中  $(AW)_i$  为向量  $[A] \{W\}$  的第i个分量。

3.3.5 进行一致性检验。一致性检验中各指标意义如下：

CI. 偏离一致性指标。  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$  (注：下接52—53页再接50—51页接54页)

## 4 单因素评价及评价矩阵

单因素评价就是根据隶属函数作出各因素对各级评语的隶属度，多数因素的隶属函数可参考现有规范的规定值经模糊化后得。由于水利工程的复杂性，有些因素的隶属函数难以用公式描述，这时采用了语言变量的模糊向量。<sup>[4] [6]</sup>

4.1 保护城镇：规范是依<sup>①</sup>保护城镇及工矿区的重要性来划分的，<sup>[2]</sup>故采用语言变量的模糊向量作为该因素的评价向量。语言变量对各级评语的隶属度见表3。

表3 语言变量对各级评语的隶属度

隶 属 度  语言变量	评语级				
	I	II	III	IV	V
特 别 重 要	0.514	0.419	0.067	0	0
很 重 要	0.441	0.396	0.159	0.004	0
重 要	0.377	0.359	0.226	0.038	0
中 等	0.326	0.318	0.253	0.103	0
一 般	0.291	0.288	0.257	0.164	0
不 重 要	0	0.021	0.170	0.383	0.426

4.2 保护农田面积：实际保护的农田面积对各级评语的隶属函数见图3。（\*）

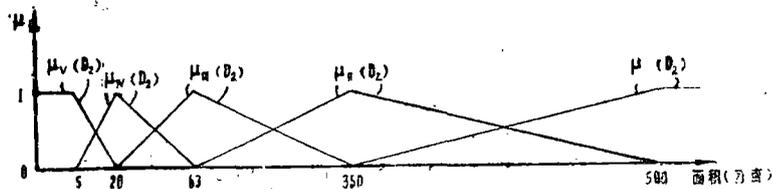


图3 保护农田面积对各级评语的隶属函数

4.3 发电：发电效益是以装机容量为指标的<sup>[2]</sup>，其隶属函数可建立如下：

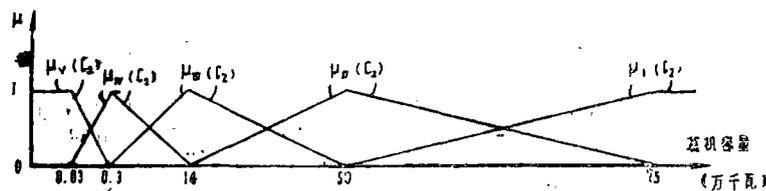


图4 装机容量对各级评语的隶属函数

\* 由于数值差值大，各隶属函数的横坐标未按比例画，应用时可按比例关系计算出隶属度。

4.4 总库容：总库容的隶属函数可建立如图5。 [2]

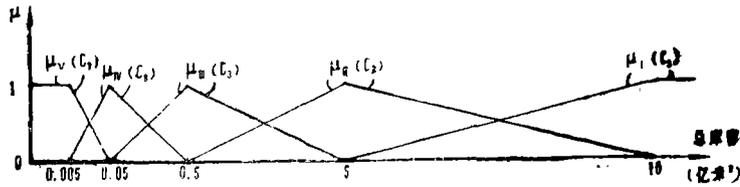


图5 总库容对各级评语的隶属函数

4.5 灌溉：参考文献 [2]，确定隶属函数如图6。

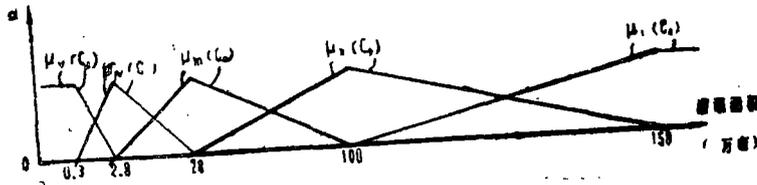


图6 灌溉面积对各级评语的隶属函数

4.6 荷载组合。考虑基本组合和特殊组合两种情况。认为采用基本组合时， $[\beta]$  的值应取“很大”。采用特殊组合时， $[\beta]$  的值可“不很大”，故确定两种情况下的隶属函数如表4。 [6]

荷载 \ 评语级	评语级				
	I	II	III	IV	V
基本组合	0.441	0.396	0.159	0.004	0
特殊组合	0	0.037	0.234	0.363	0.366

4.7 建筑物等级：由文献 [2] 知：对重力坝来说，主要以坝高作为衡量指标。坝高对各级评语的隶属函数可确定如下。

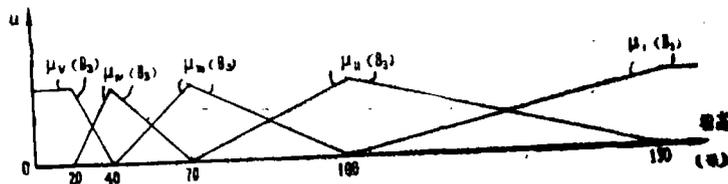


图7 坝高对各级评语的隶属函数

RI: 平均随机一致性指标。其值见表2。

CR: 随机一致性比率。CR=CI/RI, 当CR<0.10时认为判断矩阵具有满意的一致性。

下面对判断矩阵进行排序计算并检验。

A~B阵

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	$\bar{W}_i$	W <sub>i</sub>	$\frac{(AW)_i}{nW_i}$
B <sub>1</sub>	1	1	3	5	1.968	0.394	0.999
B <sub>2</sub>	1	1	3	5	1.968	0.394	0.999
B <sub>3</sub>	1/3	1/3	1	2	0.687	0.137	1.003
B <sub>4</sub>	1/5	1/5	1/2	1	0.376	0.075	1.004

$$\lambda_{\max}=4.005, CI=0.002, CR=0.002$$

B<sub>1</sub>~C阵

B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	$\bar{W}_i$	W <sub>i</sub>	$\frac{(AW)_i}{nW_i}$
C <sub>1</sub>	1	2	3	5	2.340	0.472	1.015
C <sub>2</sub>	1/2	1	2	4	1.414	0.285	1.011
C <sub>3</sub>	1/3	1/2	1	3	0.841	0.170	1.013
C <sub>4</sub>	1/5	1/4	1/3	1	0.359	0.073	1.011

$$\lambda_{\max}=4.050, CI=0.017, CR=0.019$$

C<sub>1</sub>~D阵

C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\bar{W}_i$	W <sub>i</sub>	$\frac{(AW)_i}{nW_i}$
D <sub>1</sub>	1	5	2.236	0.833	1.001
D <sub>2</sub>	1/5	1	0.447	0.167	0.999

$$\lambda_{\max}=2, CI=0, CR=0.$$

知所有判断阵都具有满意的一致性。

3. 4. 层次总排序及其一致性检验。

层次总排序由高到低逐层进行。一致性检验指标  $CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j}$ ,

如果B层某些因素对于A层某一因素  $A_i$  的单排序的一致性指标为  $CI_j$ ，相应的平均随机一致性指标为  $RI_j$ ，则上式中， $a_i$  为A层元素与  $A_i$  的权重， $m$  为A层元素  $A_i$  的个数。

要求  $CR < 0.10$ ，否则应调整到判断矩阵的取值。

1) C层总排序

C	$B_i$	$B_1$	C层总排序	CR
	$b_i$	0.394	权 值	
$C_1$		0.472	0.186	0.019
$C_2$		0.285	0.112	
$C_3$		0.170	0.067	
$C_4$		0.073	0.029	

2) D层总排序

D	$C_i$	$C_1$	D层总排序	CR
	$\alpha_{C_i}$	0.186	权 值	
$D_1$		0.833	0.155	0
$D_2$		0.166	0.031	

知总排序也具有满意的一致性。

各因素权重分配如图2。

知权重分配为  $A = (\alpha_{D1}, \alpha_{D2}, \alpha_{C2}, \alpha_{C3}, \alpha_{C4}, \alpha_{B2}, \alpha_{B3}, \alpha_{B4}) = (0.155, 0.031, 0.112, 0.067, 0.029, 0.394, 0.137, 0.075)$

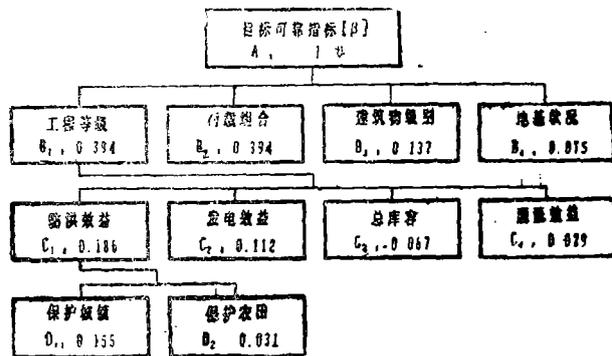


图2： 影响因素权重分配图

4.8. 地基状况：由工程技术专家对基础状况作出一个定性评价，采用语言变量的模糊向量作为地基状况的评价向量。

语言变量对各级评语的隶属度如表5 [4] [6]。

以上分析了所有因素的单因素评价隶属函数，在实际计算时，以某一具体工程的各影响因素的指标值查上述各隶属函数，即可得单因素评价向量 $R_i$ ，合成这些向量即可形成评价矩阵 $R$ 。

表5 语言变量对各级评语的隶属度

评语级 地基状况	I	II	III	IV	V
很 好	0	0.004	0.159	0.396	0.441
好	0	0.038	0.226	0.359	0.377
尚 好	0	0.103	0.253	0.318	0.326
差	0.377	0.359	0.226	0.038	0
很 差	0.441	0.396	0.159	0.004	0

## 5 综合评判定出目标可靠指标〔 $\beta$ 〕

将评价矩阵 $R$ 与权重分配 $A$ 进行模糊关系运算即可得出综合评价向量 $B$ 。

在进行综合评判时，采用 $M(\cdot, \oplus)$ 模型，当 $R$ 中的各评价向量归一化后  $M(\cdot, \oplus) = M(\cdot, +)$ ，即进行通常的矩阵乘法运算。

$$\underset{\sim}{A} \cdot \underset{\sim}{R} = \{ \underset{\sim}{A} \}^T \cdot \underset{\sim}{[R]} = \underset{\sim}{B}$$

参考文献 [1]，各级评语所对应的可靠指标 $\beta_i$ 及可靠度可选定如表6。

表6 各级评语所对应的可靠指标及可靠度

评语等级	I	II	III	IV	V
$\beta_i$	4.27	3.72	3.10	2.33	1.65
可靠度	0.99999	0.99996	0.999	0.99	0.95

利用综合评判向量 $B$ 确定目标可靠指标〔 $\beta$ 〕时，应按权重大小考虑所有分量，故采用加权平均法，即：

$$[\beta] = \sum_{i=1}^5 \beta_i B_i$$

$[\beta]$  即为所求的目标可靠指标。

## 6 两个算例

运用上述模糊层次综合评判法，对丹江口重力坝和陆水蒲圻重力坝的目标可靠指标进行计算。

### 6.1 丹江口重力坝目标可靠指标 $[\beta]$ 的确定。

丹江口水利枢纽的因素值如表7。

由表7数值，查相应的隶属函数曲线可得单因素评价向量  $R_i$ ，综合可得评价矩阵。基本荷载组合时的评价矩阵为：

$$[\tilde{R}] = \begin{Bmatrix} \tilde{R}_1 \\ \tilde{R}_2 \\ \tilde{R}_3 \\ \tilde{R}_4 \\ \tilde{R}_5 \\ \tilde{R}_6 \\ \tilde{R}_7 \\ \tilde{R}_8 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.514 & 0.419 & 0.067 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.441 & 0.396 & 0.159 & 0.004 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.038 & 0.226 & 0.359 & 0.377 \end{bmatrix}$$

特殊荷载组合时应将  $[\tilde{R}]$  中的  $\tilde{R}_6$  改为：

表7 丹江口枢纽工程因素值

序号	项 目	单 位	数 量
1	保 护 城 镇		特 别 重 要
2	保 护 农 田 面 积	万 亩	> 150
3	装 机 容 量	万 瓩	90
4	总 库 容	亿 米 <sup>3</sup>	106.5
5	灌 溉 面 积	万 亩	2700
6	荷 载 组 合		基 本、特 殊
7	坝 高	米	97
8	基 础 状 况		良 好

$$R_0' = (0, 0, 0.037, 0.234, 0.363, 0.366).$$

权重分配A已如前述:

$$A = (0.155, 0.031, 0.112, 0.067, 0.029,$$

$$0.394, 0.137, 0.075)$$

将A与[R]作关系运算得评价向量B.

$$B = A \cdot [R] = \{A\}^T [R] \quad (\text{即作矩阵乘法})$$

基本组合时:

$$B = (0.492, 0.347, 0.104, 0.029, 0.028)$$

特殊组合时:

$$B' = (0.318, 0.206, 0.134, 0.170, 0.172)$$

用表6所给 $\beta$ 向量与B或B'相乘即为目标可靠指标, 即:

$$[\beta] = \{\beta_i\}^T \{B_i\}$$

计算结果列于表9, 表中 $[\beta]$ 为目标可靠指标, Pr是与之相应的可靠度.

## 6.2 湖北陆水蒲圻重力坝目标可靠指标的确定.

该枢纽因素值见表8.

表8 蒲圻枢纽工程因素值

序号	因素	单位	数量
1	保护城镇		一般
2	保护农田面积	万亩	4
3	装机容量	万千瓦	3.52
4	总库容	万米 <sup>3</sup>	5.81
5	灌溉面积	万亩	57
6	荷载组合		基本、特殊
7	坝高	米	49
8	地基状况		良好

计算过程与上例同, 结果列于表9.

表9 计算成果表

工程名称	荷载组合	$[\beta]$	Pr
丹江口	基本	3.83	0.99994
	特殊	3.22	0.99936
蒲圻	基本	3.27	0.99946
	特殊	2.66	0.99609

将上述结果与文献<sup>[1]</sup>中的规定值相比较, 可知是吻合的。

## 参 考 文 献

- [1] 建筑结构设计统一标准。(草案) 1983
- [2] 水利水电枢纽工程等级划分及设计标准。(山区、丘陵区部分) SDJ12-78(试行) 水利出版社
- [3] 混凝土重力坝设计规范, SDJ21-78(试行) 水利电力出版社
- [4] Advances in Structural Reliability, ISRA Courses on Reliability and Risk Analysis 1984
- [5] 阎家杰 模糊数学讲义 郑州工学院
- [6] 汪培庄 模糊集合论及其应用 上科版
- [7] 赵焕臣、许树柏、和金生编著, 层次分析法 刘豹审定 科学出版社

## DETERMINATION OF PROBABILITY INDEXES FOR GRAVITY DAMS USING FUZZY TIER COMPREHENSIVE EVALUATION

Dong Yaoping

(Hydr. Eng. Dept. Zhengzhou Inst. of Technol.)

**Abstract** Fuzzy comprehensive evaluation and the analytic hierarchy process (AHP) are combined in this paper to form a new approach to determine the Probability Indexes  $[\beta]$  of gravity dams.

Evaluation matrix is formed in which support functions based on present specifications are established for some decision elements, and for others fuzzy vectors of linguistic variables are used.

Two examples are given to illustrate the correctness and the application of this method.

**keywords** probability Index, Gravity Dam, Fuzzy Evaluation, Analysis Hierarchy Process